

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

*Факультет електроніки*

(повна назва інституту/факультету)

*Кафедра мікроелектроніки*

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.3

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

(код і назва)

на тему: «Прецизійний стабілітрон на основі тунельного пробоя»

Виконав (-ла): студент (-ка) б курсу, групи ДП-72мп

(шифр групи)

Мільшин Данило Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник проф. каф. МЕ, д.т.н., с.н.с. Вербицький В.Г.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант з нормоконтролю \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) \_\_\_\_\_ Факультет електроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Кафедра мікроелектроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 153 «Мікро- та наносистемна техніка» \_\_\_\_\_  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
ДП-72мп Мільшина Данила Сергійовича**  
(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації \_\_\_\_\_ Прецизійний стабілітрон на основі тунельного пробоя \_\_\_\_\_,

науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ проф. каф. МЕ, д.т.н., с.н.с. Вербицький В.Г. \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження \_\_\_\_\_ Стабілітрон під дією пробоя \_\_\_\_\_

4. Предмет дослідження \_\_\_\_\_ Проблема технології виготовлення стабілітрона \_\_\_\_\_

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Огляд першоджерел з встановленням недоліків
  2. Шляхі подання проблем і наведення технології виготовлення стабілітронів.
  3. Провести аналіз досліджуваної теми
  4. Зробити висновки щодо ефективності створеного методу
  5. Написання магістерської дисертації
- \_\_\_\_\_

---

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Метод оцінки надійності темрокомпенсованого стабілітрона

2. Методи виготовлення низьковольтного термокомпесированного стабілітрона, що включає виготовлення базового кремнієвого кристала

---

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури	01.08.18	
2	Розробка структури вироблення прецизійного стабілітрона	11.08.18	
3	Створення умов дифузії міш'яку	25.08.18	
4	Аналіз досліджуваного стабілітрона	02.09.18	
5	Написання наукових статей	20.09.18	
6	Висновки щодо ефективності створеного методу	10.10.18	
7	Обговорення результатів з науковим керівником	20.10.18	
8	Написання магістерської дисертації	5.11.18	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Мільшин Д.С. \_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вербицький В.Г \_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

---

<sup>\*</sup> Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота «Прецизійний стабілітрон на основі тунельного пробоя» за об'ємом складає 60 сторінок 21 ілюстрацію, використано 12 інформаційних джерел.

Актуальність роботи полягає у тому, що епітаксіальна технологія отримання низьковольтних р-п-переходів вимагає використання прецизійного технологічного устаткування, є дуже енергоємною і застосовує надзвичайно токсичні матеріали: диборан, фосфин, арсин і тому подібне. Таким чином, завдання отримання низьковольтних р- п- переходів і тим більше низьковольтних термокомпенсованих стабілітронів на їх основі носять неординарний характер і відрізняються високою мірою складності.

Завдання справжнього винаходу - створення такої конструкції і способу виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона, для яких виключаються процеси локального епітаксіального нарощування товстих шарів легованого кремнію.

Об'єктом дослідження є низьковольтний термокомпенсований стабілітрон до якого висуваються підвищені вимоги до безпеки та надійності. Предметом дослідження є оцінка рівня надійності такого стабілітрона, низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона з напругою стабілізації 6,2 В.

Технічним результатом роботи є створення конструкції і способу виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона, для яких виключаються процеси локального епітаксіального нарощування товстих шарів легованого кремнію.

Ключові слова: ТКС, РЕА,

ISO26262.

## ABSTRACT

The master's thesis "The Precision Stabilizer on the basis of tunneling breakdown" in volume is 60 page 21 illustration, 12 sources of information are used.

The urgency of the work is that the epitaxial technology of obtaining low-voltage p-n-junctions requires the use of precision technological equipment, is very energy-intensive and uses extremely toxic materials: diborane, phosphine, arsine, and the like. Thus, the task of obtaining low-voltage pN transitions and, more so, low-voltage thermocompensating stabilizers on their basis are of an unusual nature and differ in a high degree of complexity.

The object of the present invention is to provide such a design and method of manufacturing a low-voltage thermosettable stabilizer, for which processes of local epitaxial build-up of thick layers of doped silicon are excluded.

The object of the study is a low-voltage thermo-compensated zener diode which is subject to increased safety and reliability requirements.

The subject of the study is to assess the reliability level of such a stabilizer, a low-voltage thermo-compensated stabilizer with a voltage of 6.2 V.

The technical result of the work is the creation of a design and method of manufacturing a low-voltage thermo-compensated stabilizer, which excludes the processes of local epitaxial build-up of thick layers of doped silicon.

Key words: TKS, REA,

ISO26262.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ .....	9
1. ВСТУП.....	10
1.1. ТУНЕЛЬНИЙ ЕФЕКТ.....	11
1.2. ЗЕНЕРОВСЬКИЙ ПРОБІЙ.....	13
2. СТАБІЛІТРОН.....	15
2.1. Параметри стабілітрона.....	16
2.2. Характеристики стабілітрона.....	17
3. ПРЕЦИЗІЙНИЙ СТАБІЛІТРОН.....	23
3.1. Огляд першоджерел з встановленням недоліків.....	30
3.2. Стабілітрон з прихованою структурою.....	34
3.3. Низьковольтний термокомпенсований стабілітрон.....	38
3.4. Наведення технології виготовлення термокомпенсованого стабілітрона.....	
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	
5. ВИСНОВКИ.....	58
6. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ

$T$  – абсолютная температура

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды

$m^*$  - эффективная масса электрона

$n$  - концентрация электронов

$P$  – вероятность нахождения элеткронов

$R$  – электрическое сопротивление

$H$  - Гамильтониан

$J$  - плотность тока

$\rho_n$  - удельное сопротивления n слоя

$\rho_p$  – удельное сопротивления p слоя

$N_D$ - концентрация доноров

$N_A$  –концентрация акцепторов

$\mu_n$  – подвижность электронов

$\mu_p$  – подвижность дырок

$l$  - ширина p-n перехода

$\varphi_0$  - высота потенциального барьера

$\varphi_T$  - температурный потенциал

$n_i$  – концентрация собственных носителей заряда

## ВСТУП

При поданні зворотної напруги електронні компоненти можуть переходити в режим пробою. Окремі види приладів спеціально спроектовані для роботи в цьому режимі, наприклад, стабілітрони.

Тунельний пробій (ефект Зенера) - електричний пробій р-п переходу, викликаний тунельним ефектом, тобто «просочуванням» електронів крізь тонкий потенційний бар'єр. При зворотному зміщенні виникає перекриття енергетичних зон (рис), внаслідок чого електрони можуть переходити з валентної зони р-області в зону провідності n-області.

Електричне поле дозволяє тунелювання електронів з валентної зони в зону провідності в напівпровіднику, що призводить до великих кількостей вільних носіїв заряду, які несподівано підвищують зворотний струм. Тунельний пробій використовується в стабілітронах.

### 1.1.Тунельний ефект

Основні носії заряду можуть переходити з однієї області в іншу тільки у тому випадку, якщо їх енергія більше від висоти потенційного бар'єру р - n переходу. Проте при певних умов носії можуть проходити (тунелювати) через потенційний бар'єр навіть тоді, коли їх енергія менше висоти потенційного бар'єру. При цьому енергія носіїв не міняється. неодмінні умови тунелювання такі: мала ширина потенційного бар'єру, наявність заповнених рівнів, з того боку бар'єру звідки відбувається тунелювання і наявність вільних рівнів з таким же енергією з протилежного боку. Такі умови утворюються в р - n переходах на основі сильнолегированих матеріалів. У разі зворотного зміщення із зростанням напруги відбувається взаємне зміщення енергетичних зон і при деякої напруги валентна зона р-області перекриватиметься із зоною провідності n- області.



Якщо заповнені валентні рівні поєднуються з незаповненими рівнями зони провідності, то електрони з р-області тунелюватимуть в n- область (мал. 2.18). Зростання зворотного струму внаслідок тунельного ефекту отримала назва тунельного пробою. вірогідність тунельного переходу електронів визначається по формулі

$$P = A \exp \left( -\frac{4\pi}{h} d \sqrt{m_n^* q \phi} \right), \quad (4)$$

де  $A$  - постійний коефіцієнт;  $h$  - постійна Планка;  $d$  - товщина;  $\phi$  - висота потенційного бар'єру;  $m_n^*$  - ефективна маса електрона. Для випадку, коли ефективна маса дорівнює масі спокою електрона,  $m_n^* = m_0$

$$P = A \exp \left( -10^8 d \sqrt{\phi} \right), \quad (5)$$

$\epsilon$  вірогідність тунелювання відзначається завтовшки і заввишки потенційного бар'єру. При цьому під товщиною бар'єру слід розуміти відстань між зонами, перекриваються, а під висотою - ширину забороненої зони. Припустивши, що розподіл потенціалу в ділянці переходу лінійний, то, якщо  $U \gg \phi_0$ , товщину  $d$  легко розрахувати по мал. 1, а саме:

$$d = \Delta \phi_g \operatorname{tg} \alpha = l \frac{\Delta \phi_g}{U} = \frac{\Delta \phi_g}{E}. \quad (6)$$

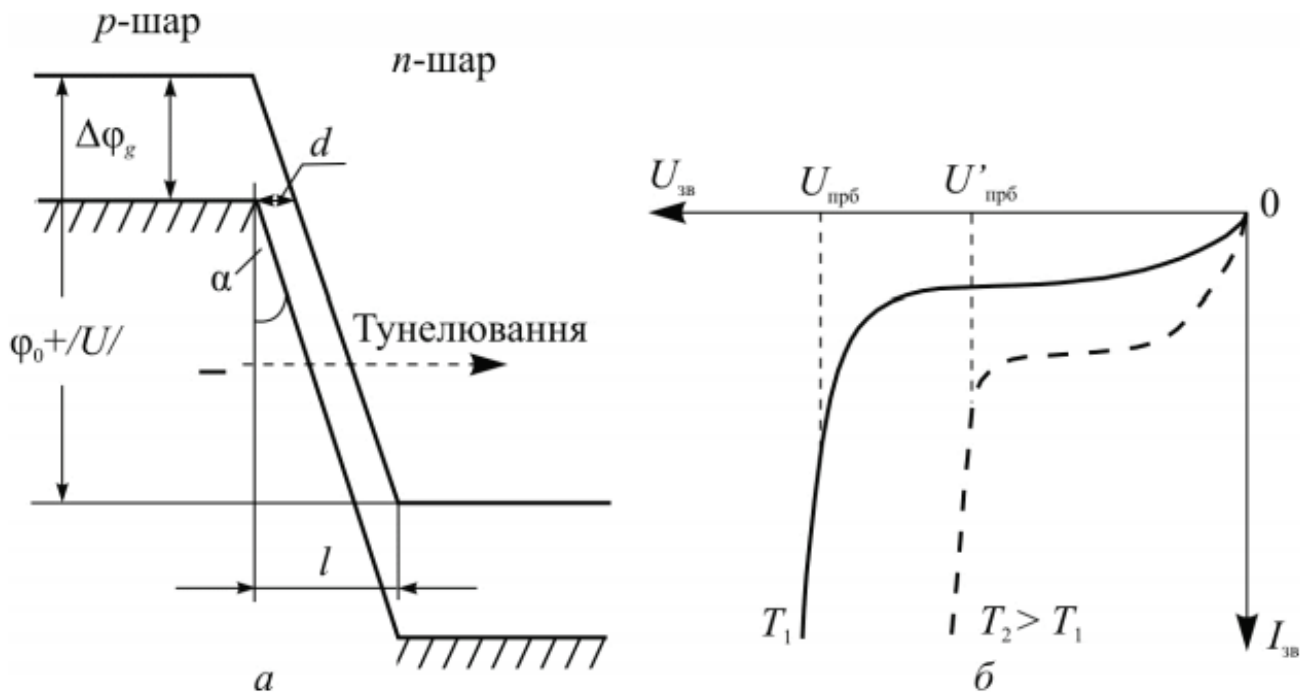


Рис. 1.3. Туннельний пробой: а - зонная диаграмма р-п перехода за обратного смещения с перекрытием зон; б - ВАХ р-п перехода с учетом пробой при двух температурах ( $T_2 > T_1$ )

Підставляючи  $d$  з рівняння (2.3) у формулу (2.1), отримуємо залежність вірогідності тунелювання від напруженості електричного поля в переході :

$$P = A \exp \left( -10^8 \frac{\Delta \varphi_g^{3/2}}{E} \right). \quad (7)$$

Вірогідність тунелювання різко зростає, коли напруженість поля досягає значення, при якому перекриваються зони. Вольт-амперну характеристику в області тунельного пробую описують приблизним вираженням:

$$I_T = I_0 \exp \left( -10^8 \frac{\Delta \varphi_g^{3/2}}{El} \right). \quad I_T = 10 I_0. \quad (8)$$

Початок пробою оцінюють умовно з рівності Звідси отримують пробивну напруженість електричного поля. для германію  $E_{прб} = 4 \cdot 10^5 \text{ В / см}$  Виходячи з цього значення напруженості електричного поля і враховуючи ширину  $p - n$  переходу, можна розрахувати напругу тунельного пробою  $U_{прб.т}$ . Оскільки максимальна напруженість  $E_{max}$  спостерігається на межі  $p$  і  $n$ -областей, то для ступінчастого переходу напруга тунельного пробою можна визначити, підставляючи у формулу (Рис 1, б) значення  $\ln$ , якщо  $x = 0$  і  $E_{max} = E_{прб.т}$  [6]

$$(9)$$

де  $\rho_b$  - питомий опір бази. На практиці для розрахунку напруги тунельного пробою використовують точніші напівемпіричні формули:

З рівняння (9) виходить, що напруга тунельного пробою  $U_z$  зростає із зростанням опору бази  $\rho$  бази. Емпіричні залежності напруги тунельного пробою  $U_z$  для різних напівпровідників мають наступний вигляд:

германій (Ge) :  $U_z = 100\rho_n + 50\rho_p$  ;

кремній (Si) :  $U_z = 40\rho_n + 8\rho_p$ ,

де  $\rho_n$ ,  $\rho_p$  - питомі опори  $n$  і  $p$  шарів, виражені в (Ом·см).

Напруга тунельного пробою зменшується із зростанням температури довкілля. Це пов'язано передусім з тим, що з підвищенням температури зменшується ширина забороненої зони.

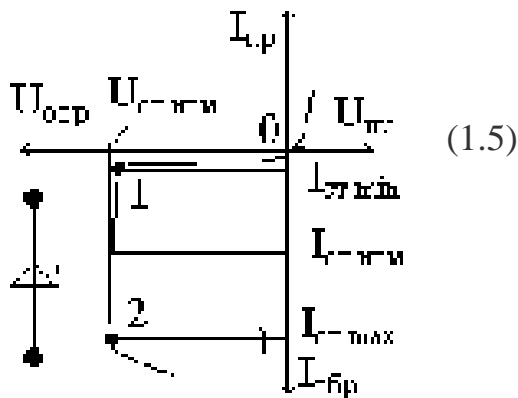
## 1.2.Пробій зенеровскій

Ефект Зенера відрізняється від лавинного пробою, який включає неосновні носії в області переходу - електрони, які прискорюються електричним полем до енергій, достатньою для виникнення вільних електронно-дірочних пар за

допомогою зіткнень зі зв'язаними електронами. Ефект Зенера або лавинний ефект можуть виникнути самостійно, або обидва можуть відбуватися одночасно. В цілому, діод пробивається при напрузі нижче 5 В ефектом Зенера, в той час як переходи, які відчують пробою при напрузі вище 5 В викликані лавинним ефектом. Пробої при проміжних напружених (близько 5 В), як правило, викликані поєднанням двох ефектів. Ця напруга пробою стабілітрона при напруженості електричного поля біля  $3 \times 10^7$  В / м. Пробій стабілітрона відбувається в сильно легованих переходах (р-типу напівпровідника помірно легованого і п-типу сильно легованого напівпровідника.), Який виробляє вузьке виснаження регіону. Лавинний пробій відбувається в слабо легованих переходах, які виробляють широке виснаження шару. Підвищення температури на стику зменшує зрив стабілітрона і збільшує внесок лавинного пробою.

## 2. Стабілітрон

Стабілітрон - це напівпровідниковий діод, виготовлений із слабо легованого кремнію, який застосовується для стабілізації постійної напруги. ВАХ стабілітрона при зворотному зміщенні має ділянку малої залежності напруги від струму того, що протікає через нього. Ця ділянка виникає за рахунок електричного пробою (рис 1. 5).



На ділянці 1-2 напруга на діоді залишається практично постійною при зміні струму через діод.

### 2.1. Параметри стабілітрона

Стабілітрон характеризується наступними параметрами: Номінальна напруга стабілізації  $U_{\text{ст. ном}}$  - номінальна напруга на стабілітроні в робочому режимі (при заданому струмі стабілізації); номінальний струм стабілізації  $I_{\text{ст. ном}}$  - струм через стабілітрон при номінальній напрузі стабілізації; мінімальний струм стабілізації  $I_{\text{ст. min}}$  - найменше значення струму стабілізації, при якому режим роботи стабільний; максимально допустимий струм стабілізації  $I_{\text{ст. max}}$  - найбільший струм стабілізації, при якому нагрів стабілітрона не виходить за допустимі межі. Диференціальний опір  $r_{\text{ст}}$  - відношення приросту напруги стабілізації до зухвалого його приросту струму стабілізації:  $r_{\text{ст}} = U_{\text{ст}} / I_{\text{ст}}$ . ТКН - температурн

ий коефіцієнт напруги стабілізації : - відносна зміна напруги на стабілітроні при зміні напруги до одного градуса. Уст. ном.  $< 5 \text{ В}$  - при тунельному пробі. Уст. ном.  $> 5 \text{ В}$  - при лавинному пробі. До параметрів стабілітронів також відносять максимально допустимий прямий струм  $I_{\text{max}}$ , максимально допустимий імпульсний струм  $I_{\text{пр. і max}}$ , максимально допустиму розсіювану потужність  $P_{\text{max}}$ . Стабілітрони призначені для стабілізації напруги на навантаженні при зміні живлячої напруги або опору навантаження, для фіксації рівня напруги і т. д.

Параметричний стабілізатор напруги. Він служить для забезпечення постійності напруги на навантаженні ( $U_{\text{н}}$ ) при зміні постійної напруги живлення ( $U_{\text{пит}}$ ) або опору навантаження ( $R_{\text{н}}$ ). Навантаження (споживач) включене паралельно стабілітрону. Обмежувальний опір ( $R_{\text{огр}}$ ) служить для встановлення і підтримки правильного режиму стабілізації. Зазвичай  $R_{\text{огр}}$  розраховують для середньої точки ВАХ стабілітрона (мал. 5).

Схема забезпечує стабілізацію напруги за рахунок перерозподілу струмів  $I_{\text{VD}}$  і  $I_{\text{Н}}$ . Проведемо аналіз роботи схеми. За другим законом запишемо співвідношення:  $U_{\text{пит}} = (I_{\text{VD}} + I_{\text{Н}}) R_{\text{огр}} + U_{\text{н}}$ . Зміна напруги живлення на  $U_{\text{пит}}$ , призводить до появи приросту напруги на навантаженні на  $U_{\text{н}}$  і струмів  $I_{\text{VD}} = U_{\text{н}}/r_{\text{ст}}$ ,  $I_{\text{Н}} = U_{\text{н}}/R_{\text{н}}$ . Запишемо початкове рівняння відносно приростів:  $U_{\text{пит}} = (U_{\text{н}}/r_{\text{ст}} + U_{\text{н}}/R_{\text{н}}) R_{\text{огр}} + U_{\text{н}}$ . Дозволимо його відносно  $U_{\text{н}}$ , отримаємо  $U_{\text{н}} = U_{\text{пит}} / [1 + R_{\text{огр}}/r_{\text{ст}} + R_{\text{огр}}/R_{\text{н}}]$ . Оскільки  $R_{\text{огр}}/r_{\text{ст}}$  велике, то  $U_{\text{н}}$  мало. Чим більше  $R_{\text{огр}}$  і менше  $r_{\text{ст}}$  тим менше зміни вихідної напруги. Розрахунок схеми (зазвичай задане  $U_{\text{пит. і RН}}$ ) : Вибір стабілітрона VD 1 з умов: і Іст. ном.  $> I_{\text{н. 2}}$ ) Розрахунок Різновиду стабілітронів :

1. Прецизійні. Вони мають мале значення ТКН і нормовану величину Уст. ном. Мале ТКН досягається шляхом включення послідовно із стабілітроном (VD 2), що має позитивний ТКН діоди (VD 1) в прямому напрямі, ТКН якого негативний. Оскільки загальний ТКН дорівнює їх сумі, то він виявляється малим за величиною.

## 2.2. Характеристики стабілітрона

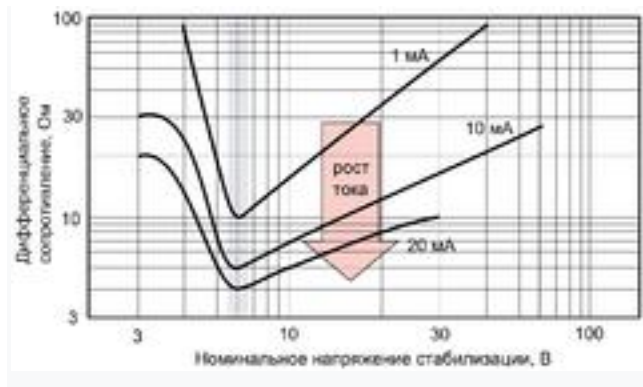
### Струми і напруга стабілізації

ГОСТ 25529-82 "Діоди напівпровідникові. Терміни, визначення і буквені позначення параметрів" визначає струм стабілізації ( $I_{ст}$ ) і напруга стабілізації ( $U_{ст}$ ) стабілітрона як значення постійної напруги і струмів в режимі стабілізації[51]. Режим стабілізації можливий в досить широкій області струмів і напруги, тому в технічній документації вказуються допустимі мінімальні і максимальні значення струмів ( $I_{ст.мін}$ ,  $I_{ст.макс}$ ) і напруги ( $U_{ст.мін}$ ,  $U_{ст.макс}$ ) стабілізації. Усередині цих діапазонів лежать вибрані виробником номінальні значення  $I_{ст}$  і  $U_{ст}$ . Мінімальний струм стабілізації зазвичай прирівнюється до струму на виході із зони перелому зворотної ВАХ, максимальний обмежений допустимою розсіюваною потужністю, а номінальний струм зазвичай встановлюється на рівні від 25 до 35 % від максимального. Мінімальні струми низьковольтних лавинних діодів вимірюються одиницями і десятками мікроампер, мінімальні струми "звичайних" стабілітронів – одиницями міліампер.

Наприклад, номінальна напруга радянського стабілітрона 2С133В, як впливає з його позначення, дорівнює 3,3 В, а номінальний струм стабілізації - струм, при якому вимірюються його паспортні характеристики, - дорівнює 5 мА. Мінімальний струм стабілізації для усіх робочих температур (- 60.+125 °С) встановлений на рівні 1 мА, максимальний, - залежить від температури і атмосферного тиску. При нормальному атмосферному тиску і температурі, що не перевищує +35 °С, струм не повинен перевищувати 37,5 мА, а при температурі +125 °С - 15 мА. При зниженні тиску до 665 Па (5 мм рт.ст, або 1/150 нормального атмосферного тиску) максимальні струми знижуються удвічі із-за гіршого тепловідводу в розрідженому середовищі. Паспортний розкид напруги стабілізації ( $U_{ст.хв}$ ,  $U_{ст.макс}$ ) цього приладу нормується для

струму 5 мА і чотирьох різних температур від - 60 °С до +125 °С. При - 60 °С розкид напруги складає 3,1.3,8 В, при +125 °С - 2,8.3,5 В.

### Диференціальний опір

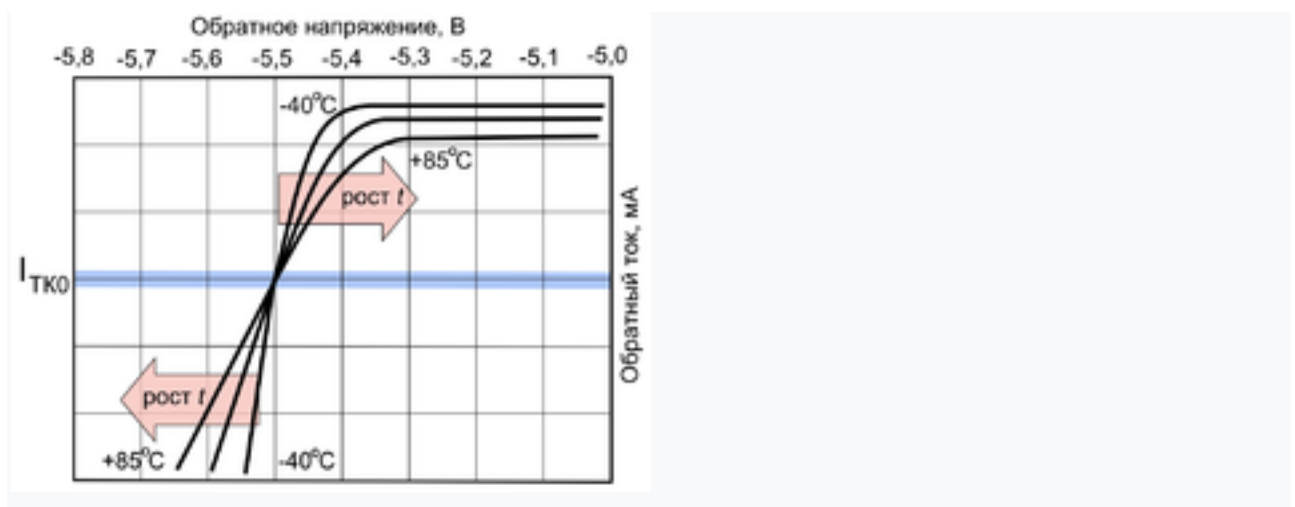


Залежність диференціального опору стабілітронів одного сімейства (Motorola, 1970-і роки) від напруги стабілізації і струму стабілізації[55] Диференціальний, або динамічний опір стабілітрона дорівнює відношенню приросту напруги стабілізації до приросту струму стабілізації в точці із заданим (зазвичай номінальним) струмом стабілізації[56]. Воно визначає нестабільність приладу по напрузі живлення (по входу) і по струму навантаження (по виходу). Для зменшення нестабільності по входу стабілітрони живлять від джерел постійного струму, для зменшення нестабільності по виходу - включають між стабілітроном і навантаженням буферний підсилювач постійного струму на емітерному повторителі або операційному підсилювачі, або застосовують схему складеного стабілітрона. Теоретично, диференціальний опір стабілітрона зменшується із зростанням струму стабілізації. Це правило, сформульоване для умови постійної температури р - n- переходу, на практиці діє тільки в області малих струмів стабілізації. При більших струмах неминуче розігрівання кристала призводить до зростання диференціального опору, і як наслідок - до збільшення нестабільності стабілізатора. Для малопотужного стабілітрона 2С133В диференціальний опір при мінімальному струмі стабілізації 1 мА дорівнює 680 Ом, а при номінальному струмі в 5 мА і температурах від - 60 до +125 °С не перевищує 150 Ом. Стабілітрони більшої потужності на ту ж номінальну напругу мають менший диференціальний опір, наприклад, КС433А



- 25 Ом при 30 мА. Диференціальний опір низьковольтних лавинних діодів (LVA) приблизно на порядок нижчий, ніж в "звичайних" стабілітронах : наприклад, для LVA351 (напруга 5,1 В, потужність 400 мВт) воно не перевищує 10 Ом при струмі 10 мА. Усередині кожного сімейства стабілітронів (одній і тій же максимальній потужності) найменші абсолютні значення диференціального опору при заданому струмі мають стабілітрони на напругу 6 В.

### Температурний коефіцієнт напруги



Точка нульового ТКН в стабілітроні з нормально позитивним ТКН ( $I_{TK0} < I_{ст.ном.}$ ) ГОСТ визначає температурний коефіцієнт напруги як "відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни температури довкілля" при заданому постійному струмі стабілізації[61]. ТКН звичайних, не термокомпенсованих діодів, при їх номінальних струмах складає для стабілітронів тунельного пробою ( $U_{ст} < 4 E_g$ ) від  $-0,05$  до  $-0,1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ , а для стабілітронів лавинного пробою ( $U_{ст} < 4 E_g$ ) - від  $0,05$  до  $0,1 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Іншими словами, при нагріві стабілітрона від  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  зрушення напруги стабілізації складе від 5 до 10 % початкового значення.

У області малих і середніх струмів на вольт-амперних характеристиках стабілітронів на напругу 4,5.6,5 В[62] можна знайти точку (значення струму  $I_{TK0}$  і напруга  $U_{TK0}$ ), в якій температурний коефіцієнт близький до нуля. Якщо стабілізувати струм такого стабілітрона зовнішнім джерелом струму на рівні, точно рівному  $I_{TK0}$ , то напруга на стабілітроні, рівне  $U_{TK0}$  практично

не залежить від температури. Такий підхід застосовується в інтегральних стабілітронних джерелах опорної напруги, але не застосований до пристроїв на дискретних стабілітронах. Точне значення  $I_{TK0}$  можна визначити тільки досвідченим шляхом, що в умовах серійного виробництва неприйнятно[63]. Стабілітрони на напругу менше 4,5 В також мають точку нульового ТКН, але вона знаходиться за межами області безпечної роботи[62]. Стабілітрони на напругу понад 6,5 В мають позитивний (ненульовий) ТКН в усьому діапазоні струмів[62].

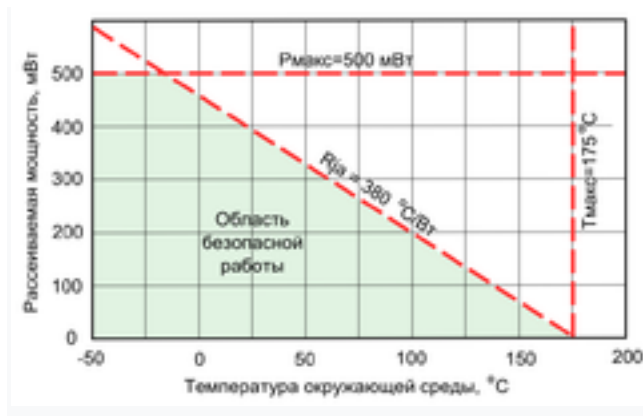
### Дрейф і шум

У довідковій документації на звичайні, не прецизійні, стабілітрони показники дрейфу і шуму зазвичай не вказуються. Для прецизійних стабілітронів це, навпаки, найважливіші показники нарівні з початковим розкидом і ТКН. Високий рівень шуму звичайних стабілітронів обумовлений високою концентрацією сторонніх домішок і дефектів кристалічної решітки в області р - n- переходу. Захисна пасивація оксидом або склом, при якій ці домішки виштовхуються з приповерхневих шарів в товщу кристала, знижує шуми лише частково. Радикальний спосіб зниження шуму - виштовхування углиб кристала не домішок, а самого р - n- переходу - застосовується в мал шумливих стабілітронах з прихованою структурою. Кращі зразки таких приладів мають розмах низькочастотних (0,1-10 Гц) шумів не більше 3 мкВ при тривалому дрейфі не більше 6 мкВ за перші 1000 годин експлуатації.

Найбільший рівень шумів стабілітрона спостерігається в області перелому вольт-амперної характеристики. Інструментальні зняті криві високого розділення показують, що ВАХ перелому мають не гладкий, а ступінчастий характер; випадкові зрушення цих східців і випадкові переходи струму із ступеня на ступінь породжують так званий шум мікроплазми. Цей шум має спектр, близький білому шуму в смузі частот 0-200 кГц. При переході з області перелому ВАХ в область струмів стабілізації рівень цих шумів різко

знижується[68]. Динамічні характеристики[правити | правити код] Частота перемикання стабілітрона загального призначення зазвичай не перевищує 100 кГц[69]. Пробій не відбувається миттєво, а час спрацьовування залежить як від переважаючого механізму пробою, так і від конструкції стабілітрона. Під час цього процесу напруга на стабілітроні може перевищувати його номінальне значення стабілізації. Частотний діапазон схем перемикачів на стабілітронах можна розширити, включивши послідовно з стабілітроном швидкий імпульсний діод. При зменшенні напруги на ланцюжку стабілітрон-діод діод закривається першим, перешкоджаючи розрядці місткості стабілітрона. Заряд на цій місткості достатньо довго підтримує на стабілітроні напругу стабілізації, тобто стабілітрон ніколи не закривається.

### Область безпечної роботи



Обмеження області безпечної роботи стабілітронів серії NZX при безперервній стабілізації напруги "Історія показала, що головною причиною виходу діодів з ладу є перевищення допустимих електричних і теплових навантажень". Керівництво по напівпровідникових приладах НАСА. Область безпечної роботи стабілітрона обмежена рядом параметрів, найважливішими з яких є максимальні значення постійного струму, імпульсного струму, температури р - n- переходу (+150 °C для корпусу SOT - 23, +175 °C для корпусу DO - 35, +200 °C для корпусу DO - 41) і розсіюваної потужності. Усі ці обмеження повинні виконуватися одночасно, а недотримання хоч би одного з них веде до руйнування стабілітрона.

Обмеження по струму і потужності очевидні, а обмеження по температурі вимагає оцінки допустимої потужності, при якій розрахункова температура р , -

p- переходу не перевищить максимально допустимою. У технічній документації така оцінка зазвичай наводиться у формі графіку залежності допустимої потужності  $P$  від температури довкілля  $T_a$ . Якщо такого графіку немає, слід оцінити допустиму потужність по формулі для температури переходу - (000-0-) -, де  $R_{ja}$  - тепловий опір між p - n- переходом і довкіллям (повітрям) для безперервно розсіюваної потужності. Типове значення цього показника малопотужного стабілітрона, наприклад, серії NZX, рівне 380 °C/Вт[74]. Потужність, при якій розрахункова температура не перевищуватиме встановленої межі в +175 °C, обмежена величиною. Для очікуваної температури довкілля +50 °C розрахункова потужність складає всього 330 мВт - в півтора рази менше паспортного максимуму потужності в 500 мВт.

### **Характер і причини відмов**

Катастрофічне коротке замикання може бути викликане не лише виходом за межі області безпечної роботи, але і повільною дифузією атомів легуючої домішки в p - n- переході. У силових стабілітронах з пружинним кріпленням одного з виведень до кристала спостерігаються механічні ушкодження кристала в зоні контакту з пружиною. Якщо тріщина або потертість кристала досягає зони p - n- переходу, то можливе як катастрофічне, так і таке, що перемежається, "блукаюче" коротке замикання, а також стабільне зменшення напруги стабілізації. Старіння стабілітронів може проявлятися у вигляді підвищеного дрейфу струмів, напруги і диференціального опору. Дрейф струму при тривалій експлуатації пояснюється накопиченням забруднюючих домішок в зоні p - n- переходу, в шарі захисного оксиду і на його поверхні. Дрейф струму при випробуваннях при високій вологості пояснюється негерметичною корпусу стабілітрона. Дрейф вихідного опору, що зазвичай супроводжується підвищеним рівнем шуму.

### 3. Прецизійний стабілітрон

Початок був покладений у кінці 60-х років створенням на підприємстві лабораторії прецизійних вимірів, де до цього вже існувала лабораторія по розробці стабілітронів і був створений прилад Д818 (1966 р.). У 1970 р. точність виміру параметрів стабілітронів не перевищувала 0,01-0,005% за 1000 ч, а апаратура виготовлялася зовнішніми підприємствами і більше була лабораторною, чим промисловою. Вимір стабільності напруги стабілізації (так цей параметр тоді іменувався) вівся в масляних ультратермостатах типу УТ- 15 (мал. 1) з плоским нагрівачем і контактним ртутним термометром, який через реле включав нагрівач. Олію в робочій місткості термостата перемішував потужний стандартний електродвигун. Мал. 1 - Ультратермостат УТ- 15 Касета із стабілітронами опускалася прямо в олію. Напруга стабілізації вимірювалася потенціометром Р308 через дільника відносно насиченого нормального елементу (НЭ). Робочий струм контролювався при кожному вимірі по котушці опору і нормальному елементу. За період з 1970 р. до 90-х років (коли відношення до метрології змінилося) лабораторією прецизійних вимірів були розроблені Гости по термінах, системі параметрів, методах вимірів параметрів прецизійних стабілітронів, у тому числі диференціального опору, напруги стабілізації, його температурного коефіцієнта, тимчасової нестабільності, напруги низькочастотних шумів. За цей період підприємством самостійно, із залученням контрагентів по найбільш відповідальних позиціях, було створено чотири покоління вимірювальних і перевірочних комплексів для контролю параметрів прецизійних стабілітронів. Усі комплекси були виготовлені у рамках ДКР з повним комплектом документації і впроваджені на Московському і Саранську заводах. 2 До складу комплексу першого покоління (мал. 2) входили стойки термостатів з масляними камерами власної розробки (мал. 3). Пропорційний регулятор температури і надійний авіаційний електродвигун забезпечували в камерах рівномірний круговий нагрів олії. Датчиком температури служив платиновий термометр, при цьому точність завдання і підтримки температури складала  $\pm 0,1$  Із за 1000 ч напрацювання. Опорне джерело - термостатована в олії міра напруги на основі групи з 20

прецизійних стабілітронів. Генератор струму і зразкові заходи опору термостатировані при 45 градусах Цельсія так само як і міра напруги.



Рис. 2

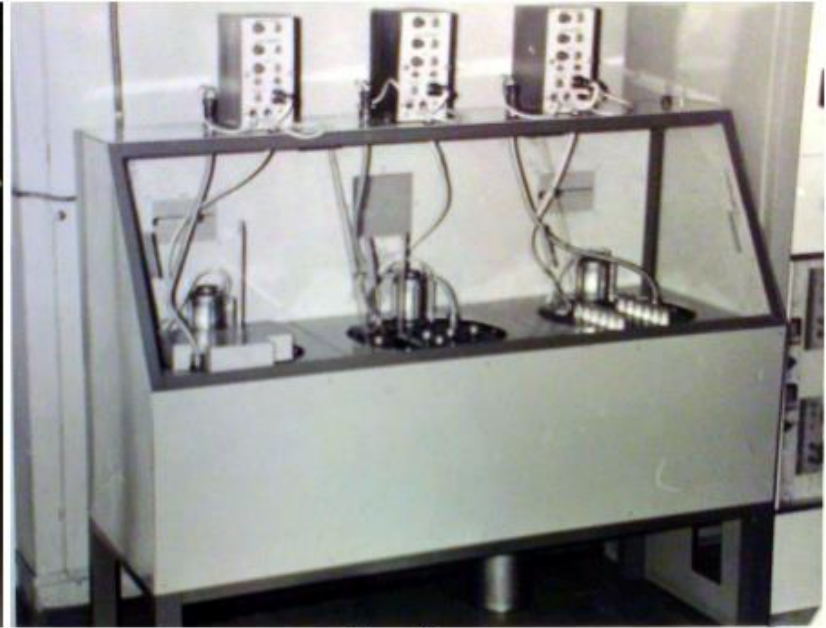


Рис. 3

Мал. 2 Мал. 3

Живлення груп стабілітронів здійснювалося від автономного стабілізатора напруги, і при вимірах вводилася поправка на дрейф опорного джерела. Генератор струму зібраний на основі групи з 20 шт. прецизійних стабілітронів. В якості токозадаючих і резисторів, що підсумовують, були застосовані дротяні резистори ПТМН- 1. Перед виміром стабілітрони знаходилися в камерах під струмом підігрівання від стабілізатора напруги через токозадающие резистори. Комутатор - ручний (механічний) з величиною ТЕРМОЭДС не більше 1 мкВ. Вимірювальний прилад - 6,5-розрядний цифровий вольтметр фірми Takeda Riken моделі TR6567 (мал. 4) з друкувальним пристроєм. Мал. 4 3 До складу перевірного комплексу входили термостатовані зразкові заходи 1-го розряду ЭДС, опори і температури, а також напівавтоматичний потенціометр Р345 класу 0,001. Перевірочне устаткування розміщувалося в спеціальному екранованому приміщенні. Підключення заходів устаткування до засобів перевірки виконувалося через коаксіальний кабель. У другому поколінні комплексів резистори ПТМН- 1 були замінені манганиновими друкарськими резисторами і дротяними резисторами С5-5, використані спеціальні перемикачі з низьким рівнем ТЕРМОЭДС і автоматичний потенціометр Р332 красnodарського заводу

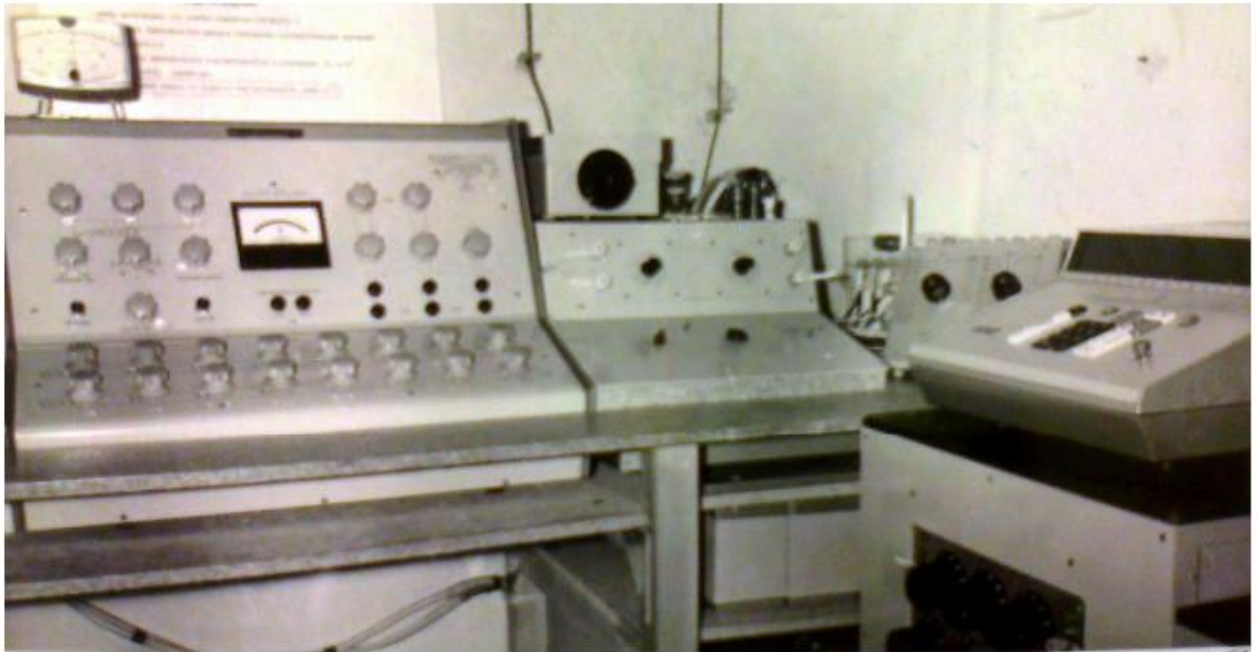


Рис. 5

(мал. 5). Створені комплекти засобів вимірів і перевірки дозволили випускати прецизійні стабілітрони класу довготривалої стабільності 0,02-0,005 за 1000 ч. Мал. 5 В третьому поколінні комплексів для випуску приладів класу точності 0,001-0,0005 були створені засоби вимірів (мал. 6-7) і перевірки на новій базі термостата, розроблений лабораторією. Двоконтурний термостат був моноблоком з алюмінієвого сплаву у формі тора, в якому по кільцю розташовані 20 циліндричних отворів для гільз - касет. Останні теж зазнали зміни. Замість групових касет (на 20 шт.) введені індивідуальні, в яких по 4-х дротяній схемі упаяні випробовувані стабілітрони. Пропорційний терморегулятор на тиристорах замінений транзисторним. Датчики температури - терморезистори розташовані симетрично по контурах нагріву. Температурний градієнт по моноблоку забезпечують мідні диски діаметром 10 мм згори і знизу блоку. У нижній частині розташовані блокові частини роз'єму 2РМ. Касета має частину у відповідь роз'єму, а на її платі по 4-х дротяній схемі упаяний випробовуваний стабілітрон. Кожна касета має тепловий екран з мідної знімної гільзи для зменшення температурних градієнтів по об'єкту виміру. У центрі моноблока є об'єм для розміщення плат комутації і схем завдання режиму. 4 Мал. 6 Мал. 7 Перехід на нові моноблоки термостатів (у цеху їх прозвали "булахстатами") дозволив відмовитися від витягу,



необхідного при роботі з масляними камерами, і значно спростити технологію виготовлення. Вимірювально-перевірочний комплекс із застосуванням нових моноблоків термостатів був двома вертикальною стойкою і столом з чотирма робочими термостатованими камерами. У першій стойці розташовувалися: міра напруги на основі групового з'єднання 20-ти стабілітронів, комутатор для контролю кожного із стабілітронів відносно середнього значення і для підключення до засобів перевірки, блоки живлення міри і терморегуляторів. Стабілітрони розміщені в знімних касетах, що полегшувало їх відбір і заміну в процесі експлуатації. 5 В другій стойці змонтовані моноблоки вимірювального стабілізатора струму, підогревних стабілізаторів струму і заходів опору, пульт управління, цифровий вольтметр В2-Д (см прим.). Засоби перевірки включали потенціометр Р332, термостатовані насичені нормальні елементи 1-го розряду з нормованою нестабільністю за 1000 ч на рівні робочого еталону Вольты, комутатори на основі перемикачів для потенціометрів з низькою ТЕРМОЭДС (м. Краснодар). Погрішність виміру тимчасової нестабільності напруги стабілізації на рівні 6 і 9 В склала  $\pm 0,00015\%$  за 1000 ч. Одночасно були створені засоби вимірів і інших параметрів прецизійних стабілітронів, у тому числі для контролю ТКН в діапазоні температур від - 60 до +125 градусів Цельсія, установка контролю напруги низькочастотних шумів по нормі 40 мкВ, міра напруги, що транспортується, з тимчасовою нестабільністю  $\pm 0,001\%$  за 1000 ч на рівні 9 В (мал. 8), цифровий вольтметр В2-С (см прим.) класу точності 0,005 з межа вимір 1 і 10 В. мал. 8 для забезпечення розробка і випуск прецизійний стабілітрон з тимчасовий нестабільність  $\pm 0,0002$  за 1000 ч і  $\pm 0,0001$  за 168 ч на рівні 6 і 9 в і з рівень шум менше 10 мкВ вимагається вирішив складніший метрологічний і виробничий завдання. В цей час у складі лабораторії були три провідні інженери, три старші інженери, інженери, технік, радіорегулювальники і радіомонтажники, всього 25 чоловік. Їм допомагали відмінний конструкторський відділ і професійний експериментальний цех. Для розробки комплексу четвертого покоління ми притягнули: ВНИИМ ім. Д. И. Менделеева, ВНИИФТРИ, ЗИП, РИП, ВНИИЭП (м. Краснодар), ГНИПИ (м. Горький), а також підприємства Львова, Мінська, Києва і інших розробників високоточних комплектуючих. Було створено реле



РВ-5А, вольтметри В1-18В, вольтметр В2-С, заходи на основі ефекту Джозефсона (ВНИИМ, ГНИПИ, ВНИИФТРИ). У автономному приміщенні поза підприємством, де раніше було бомбосховище, лабораторія організувала метрологічну ділянку. Були виконані роботи по екрануванню приміщень, установці індивідуальних кондиціонерів, розводці кабельних ланцюгів з низьким рівнем ТЕРМОЭДС. До цього часу на групу з 10 шт. 6 насичених нормальних елементів ми отримали статус робочого еталону одиниці ЭДС. Розробивши трьохконтурні термостати (мал. 9) для зберігання НЭ еталону і дублюючої групи зберігання розміру одиниці, ми забезпечували підтримку точності на період щорічної доставки НЭ еталону у ВНИИМ. Транспортування насичених НЭ зразкових заходів і робочих еталонів виконувалося двома співробітниками лабораторії. НЭ розміщувалися на рамках в пасивному термостаті з термосами (мал. 10). Робочий еталон розбивався на дві групи, і НЭ транспортувалися в двох термостатах з метою забезпечення збереження у разі непередбачених обставин при транспортуванні. Мал. 9 Мал. 10 Сховище робочого еталону одиниці ЭДС і робочого еталону одиниці електричного опору було екрановано, мало введення автономного контура заземлення з величиною опору не більше 0,5 Ом (мал. 11). Поряд з сховищем знаходилася перевірна кімната з такими ж, як в сховищі, екраном і заземленням. Сюди від робочих заходів установок і заходів ЭДС робочого еталону і резервної групи поступала напруга і ЭДС до комутатора, який дозволяв послідовно або зустрічно включати НЭ для звірення із заходами напруги. На першому етапі застосовували потенціометр Р332, потім Р3003 (мал. 12). Поряд з перевірочним приміщенням розміщувалася міра на основі ефекту Джозефсона (мал. 13), а через стінку - стаціонарні заходи напруги на основі групи прецизійних стабілітронів (мал. 14), які входили до складу перевірочного комплексу. Мал. 11 - Співробітники лабораторії готують котлован для заземлення Мал. 12 7 Мал. 13 Мал. 14 Вимірювальних комплексів (мал. 15) розміщувалися в технічному приміщенні поблизу перевірочного і еталонного приміщень. До складу вимірювального комплексу входили: міра електричної напруги високої точності на 6,4 і 9 В (мал. 16, ліворуч); система вимірювальна; система термостат; стенд атестаційний (мал. 17) і система термостатная. Мал. 15

Міра електричної напруги (мал. 16) містила п'ять термостатованих джерел опорної напруги, блоки живлення, терморегулятори, термостатовані стабілізатори напруги, комутатор, цифровий вольтметр В1-18В і МІКРО-ЕОМ.

8 Мал. 16 Мал. 17 Вихідна напруга міри формувалася шляхом усереднювання напруги стабілізації 100 шт. стабілітронів з п'яти незалежних груп по 20 шт. Для цього застосовані фольгові матриці резисторів, герметичні резистори С5-61, підсилювачі з низьким рівнем шуму. Таким чином забезпечувалися тимчасова нестабільність вихідної напруги на рівні 6 В не більше  $\pm 0,00002\%$  за 168 ч і  $\pm 0,00004$  за 1000 ч, вихідний опір не більше 10 Ом і нестабільність температури в термостатах не більше  $\pm 0,05$  градусів Цельсія при номінальному значенні 45 градусів Цельсія. До складу вимірювального комплексу були введені заходи напруги (мал. 18), що транспортувалися, з наступними параметрами: вихідна напруга 9 В, 6,4 В і 1 В; час виходу на режим 2 години; нестабільність вихідної напруги за 6 ч  $\pm 0,00005\%$ , за 168 ч  $\pm 0,0001\%$ , за 1000 ч  $\pm 0,0002\%$ ; вихідний опір на межі 1 В не більше 1000 Ом, на інших 0,1 Ом; маса 5 кг, споживана потужність 15 Вт при напрузі живлення  $\sim 220$  В. В мірі, що транспортується, застосована група з 20 стабілітронів і введена температурна компенсація в дільника напруги. Уся група стабілітронів і резистори розміщені в термостаті. Мал. 18 9 В цілому вимірювальний комплекс забезпечував вимір параметрів прецизійних стабілітронів : - тимчасовій нестабільності напруги стабілізації з погрешністю не більше  $\pm 0,00003-0,0001 \%$  за час 168-1000 ч; - ТКН з погрешністю не більше  $\pm 0,0003 \%$  в діапазоні температур від - 60 до +125 градусів Цельсія; Продуктивність комплексу складала більше 160 вимірів в зміну при безперервному режимі роботи і місткості атестаційного стенду (де прилади знаходяться між циклами вимірів) не менше 400 шт. Комплекс перевірочний був призначений для спільної роботи з робочими еталонами Вольт, Ома і Кельвіна. До його складу входили стаціонарні заходи на стабілітронах, міра електричної напруги, що транспортується, на ефекті Джозефсона з кріогенним перетворювачем напруги (робота ВНИИФТРИ). У якості нуля індикатора використаний нановольтметр постійного струму Tinsley 6045 з нижньою межею виміру 10 нВ. Для звірення заходів в перевірочному приміщенні

розміщувався потенціометр Р3003, 8,5-розрядний прецизійний вольтметр Solartron 7081, цифрові вольтметри В1-18В класу точності  $\pm 0,0002$  на межах 1 і 10 В, прецизійні комутатори і комутаційні пристрої для зв'язку з об'єктами перевірки.

## Ионы НА ОСНОВЕ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ Зенерівський перехід

В напівпровідникову електроніку для отримання стабільної напруги найчастіше використовують зворотну гілку вольтамперної характеристики р - n переходу із Зенерівським пробоем. Зенерівський пробій відбувається при напрузі приблизно від 5 до 10 В. Для отримання хороших метрологічних характеристик потрібно струм через перехід не менше декілька десятків мА... Отримуване таким шляхом напруга має позитивний температурний коефіцієнт, залежний від напруги Зенерівського пробоя цього переходу і струму через нього. Для його компенсації в прецизійних Зенерівських стабілітронах послідовно із Зенерівським включають прямозміщені діоди, що мають негативний температурний коефіцієнт.

У вітчизняному прецизійному стабілітроні Д818 таких переходів 3. Вибором протікаючого струму вдається істотно поліпшити термостабільність. Часто в технічних описах зустрічається термін "buried Zener". Він відбиває технологічний прийом, коли для підвищення стабільності перехід формується під поверхнею напівпровідникового кристала і відокремлений від неї захисним дифузійним шаром, що дозволяє понизити вплив механічної напруги, забруднень і порушень кристалічної решітки, які найсильніше проявляються на поверхні. Кращі результати з використанням Зенерівського стабілітрона досягнуті світовим лідером в області калібраторів Fluke Corp. Модель калібратора 734А, що використовує спеціально розроблену фірмою мікросхему, яка не продається окремо, і термостабілізацію, має при такому ж як у нормального елемента напрузі стабільність 0,8 ppm/місяць і 2 ppm/рік, температурну залежність 0,1 ppm/°C, тобто порівнянні з нормальним елементом [3]. Кращі інтегральні джерела опорної напруги провідних виробників напівпровідників, що випускаються серійно, мають порівнянні

характеристики. Наприклад, ADR292 має тимчасову нестабільність 0,2 ppm/1000 годин, тобто майже за півтора місяці, а температурний коефіцієнт 5...25 ppm/ C, REF102 до 2,5 ppm/ C з можливістю підстроювання, MAX671 температурну залежність менше 1 ppm/ C без термостатування. Багато прецизійних інтегральних схем опорних джерел напруги мають вбудовані датчики температури кристала, що дозволяють значно поліпшити температурну стабільність результатів виміру одним з двох шляхів : будувати прецизійні стабілізатори температури або програмно коригувати результати вимірів. Деякі Іони мають вбудовані нагрівачі (LT1019). Слід зазначити, що усі напівпровідникові ІОН мають гістерезис по температурі, тобто при поверненні до первинної температури після нагріву або охолодження, величина опорної напруги повертається до колишньої величини з деякою погрішністю. Мінімальне значення має порядок 20 ppm (MAX6225). На жаль, найчастіше виробник не вказує цю величину. Щоб уникнути цієї погрішності в калібраторі Fluke 734a ІОН завжди знаходиться при постійній температурі, і для термостатування при перевезенні передбачений акумулятор, розрахований на 36 годин безперервної роботи. Якщо потрібна більша опорна напруга, чим забезпечує Зенерівський пробій, стабілітрони можуть включатися послідовно, причому спеціальний підбір стабілітронів в групі дозволяє понизити сумарний температурний коефіцієнт.

Кращі у світі результати на цьому шляху досягнуті російською фірмою "Мегавольт-метрологія" в установці DWINA - 1000, поставленою випробувальному центру IREQ в Канаді. Максимальна напруга 1000000 В, основною погрішністю 20 ppm і температурною в діапазоні від 15 C до 35 C 2,5 ppm (відмітимо що це не градієнт, а максимальна зміна в цьому діапазоні температур) [4]. Проте значно частіше потрібно напругу менша напруга Зенерівського пробою.

Очевидним і використовуваним шляхом є прецизійне ділення напруги, отриманої на Зенерівському стабілітроні, як це зроблено в AD584, що має одночасно виходи 10 В, 5 В і 2,5 В.

В якості дискретних і інтегральних джерел опорної напруги (ІОН) широко застосовуються прецизійні термокомпенсовані стабілітрони і стабілітрони з прихованою структурою.

### 3.1.Огляд першоджерел з встановленням недоліків

Прецизійні стабілітрони використовуються як джерела еталонної напруги або опорних елементів в різних схемах, де потрібна висока точність стабілізації рівня напруги. Прецизійні стабілітрони, не поступаючи нормальним елементам II класу по стабільності в часі, вигідно відрізняються від них великими робочими струмами, значно меншим диференціальним опором, ширшим інтервалом робочих температур, малими габаритами, стійкістю до механічних дій. Промисловість випускає прецизійні стабілітрони типу Д818, у яких компенсуючі діоди поміщені в одному корпусі із стабілітроном. При перевірці прецизійних стабілітронів, наприклад Д818, на екрані спостерігатиметься фігура, зображена на мал. 16.14, р. По відстані між відрізком вертикальної лінії і центром екрану визначають напругу стабілізації

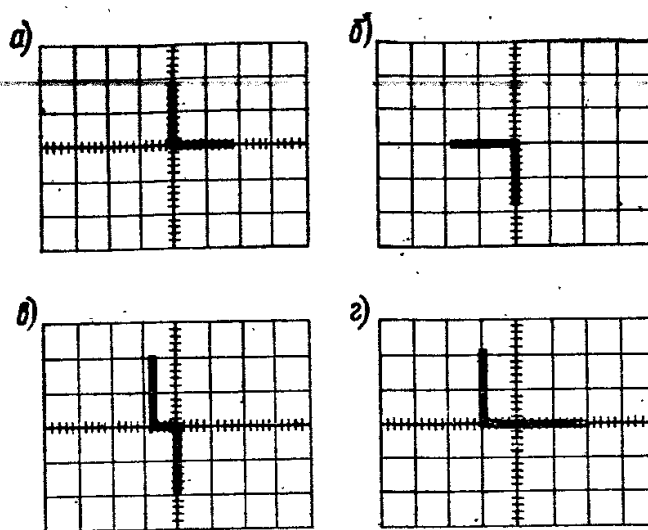


Рис. 16.14. Осциллограммы при исследовании диодов (а, б) и стабилитронов (в, г)

Технологічна схема виготовлення високостабільних прецизійних стабілітронів побудована на використанні досконалішого дифузійно-сплавного методу. У структурі таких приладів є три переходи: основний, такий, що включається у зворотному напрямі, і два термокомпенсируючих, таких, що включаються в прямому напрямі. [8] Технологічна схема виготовлення високостабільних прецизійних стабілітронів побудована на використанні досконалішого ДИФУЗІЙНО-СПЛАВНИЙ методу. Проте трудність виготовлення таких прецизійних стабілітронів обмежує їх широке застосування. З, а для прецизійних стабілітронів може доходити до  $0,001\% / ^\circ\text{C}$ .

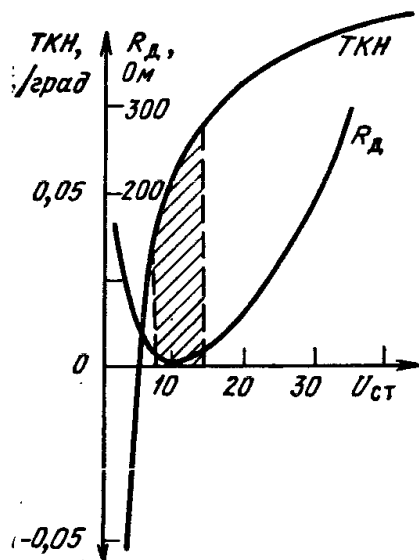


Рис. 4.3. Зависимость ТКН и дифференциального сопротивления от напряжения стабилизации.

Так, например, в *прецизионных стабилизаторах* Д818 последовательно с основным включены в прямом направлении два компенсирующих р-п перехода. Таким путем можно создать стабилизаторы с ТКН, не превышающим  $0,001\% / ^\circ\text{C}$ .

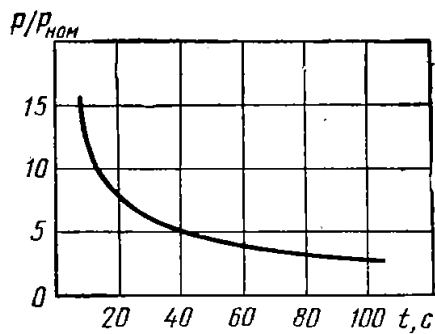


Рис. 5.4. Перегрузочная способность стабилитронов Д808 и Д813 при температуре окружающей среды 50° С

Спосіб температурної компенсації за рахунок включення послідовно із стабілітроном діода використаний при промисловому виготовленні спеціальних температурно-компенсованих прецизійних стабілітронів типу Д818, у яких прямо і назад зміщені переходи для досягнення однакової їх температури об'єднані в одному корпусі. Так, у стабілітрона Д818Г ТКН 0 005 % / 3, а у стабілітрона Д813 з тими ж, окрім ТКН, параметрами ТКН 0 08 % / С. РУ і низькою точністю ланцюгів внутрішнього калібрування електронно-променевих осцилографів в комплект акселерометра входить зразкове джерело постійної напруги, що містить прецизійний стабілітрон із зразковим дільником напруги.

Схема стабілізатора постійної напруги (джерела зразкової напруги) на базі стабілітрона VD і операційного підсилювача приведена на мал. 3 25 Розрахувати опори R, Ri, Rs, якщо вихідна напруга 1) 0 стабілізатора 12 В, VD - прецизійний стабілітрон типу КС191П; операційний підсилювач вважати ідеальним. Привабливі на перший погляд в якості опорних джерел напруги для різних цілей стабілітрони, проте, не так прості у використанні з багатьох причин: вони мають кінцевий набір значень напруги, у них великий допуск на напругу стабілізації (окрім дорогих прецизійних стабілітронів), вони сильно шумлять і їх напруга залежить від струму і температури. Ось приклад двох останніх ефектів: стабілітрон на 27 В з поширеної серії IN5221 стабілітронів на 500 мВт має температурний коефіцієнт близько 0 1 % / 3, і в силу цього його напруга міняється на 1 %, коли струм змінюється від 10 до 50 % від максимального.

Параметри деяких стабілітронів, що випускаються промисловістю, а також кремнієвого стабістора 2С107А приведені в таблицю. 4.2. Стабілітрони загального призначення, вживані в основному в стабілізаторах і обмежувачах постійного струму ( Д808 - 813, КС156А, КС168А та ін.), виготовляють сплавним методом, а прецизійні стабілітрони ( наприклад, Д818), що використовуються як еталонні джерела напруги або опорних елементів великої точності, роблять дифузійним способом. Конструктивно стабілітрони, як і інші типи діодів, герметизуються в металло-стекляних корпусах.

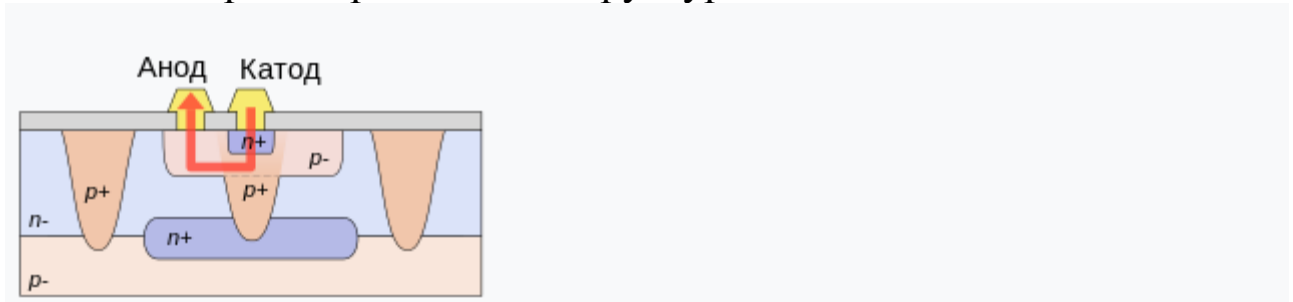
Прецизійні стабілітрони використовуються як джерела еталонної напруги або опорних елементів в різних схемах, де потрібна висока точність стабілізації рівня напруги. Прецизійні стабілітрони, не поступаючись нормальним елементам II класу по стабільності в часі, вигідно відрізняються від них великими робочими струмами, значно меншим диференціальним опором, ширшим інтервалом робочих температур, малими габаритами, стійкістю до механічних дій. Безперервно покращуються параметри стабілітронів. Нині створені і отримали широке застосування високостабільні температурно-компенсовані прецизійні стабілітрони, що не поступаються по точності підтримки еталонної напруги нормальним елементам Вестону, а за іншими експлуатаційними характеристиками багато в чому перевершуючі останні.

Інтегральні ОУ застосовуються у високостабільних джерелах опорної напруги в якості буферних підсилювачів постійних сигналів, за допомогою яких розвантажують джерело опорної напруги, одночасно забезпечуючи в певних межах підстроювання вихідної стабілізованої напруги. Прецизійні стабілітрони можуть мати  $\text{Ost } 0,0005\% / 3$  в діапазоні температур від - 60 до, 60 С. Такі стабілітрони застосовують в автоматичних регуляторах замість нормального елемента. У стабілітронів з напругою приблизно 6 В ТКН мінімальний. Для зменшення ТКН розроблені так звані температурно-компенсовані прецизійні стабілітрони. У цих приладах шляхом послідовно сполучених двох або більше р - n переходів з різними по знаку ТКН вдається отримати стабілітрони з ТКН не більше  $0,0005\% / 3$  в широкому діапазоні температур. Такі стабілітрони можуть застосовуватися в джерелах еталонної напруги замість нормальних



елементів. Ряд стабілітронів ( 2С175Ж - 2С224Ж, КС175Ж - КС224Ж) використовується в імпульсних режимах і застосовується для стабілізації амплітуди імпульсів, їх обмеження, а також для захисту входів чутливих пристроїв від перевантажень по напрузі.

### 3.2.Стабілітрон з прихованою структурою



Поперечний розріз стабілітрона з прихованою структурою. Стрілка - шлях струму пробію. Співвідношення вертикального і горизонтального масштабу і товщини шарів - умовні.

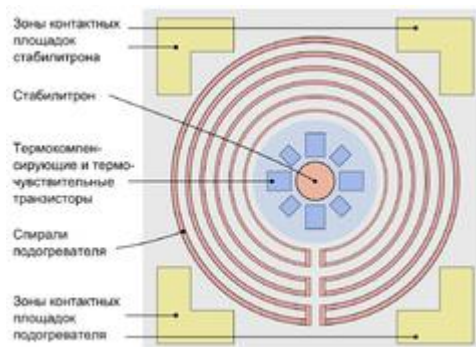
Струм пробію звичайного планарного стабілітрона зосереджений в при поверхневому шарі кремнію - в шарі з максимальною концентрацією дефектів кристалічної решітки і сторонніх домішок. Саме ці домішки і дефекти і обумовлюють нестабільність і шум стабілітрона. Поліпшити його показники можна, якщо «загнати» ток пробію вглиб кристала, в приховану структуру р-п-переходу з меншим, ніж у поверхневому шарі, напругою пробію. У класичній епітаксiальної технології на місці майбутнього стабілітрона формується глибокий острівцець р + -типу провідності, а потім проводиться звичайні дифузії базового (р-) і емітерного (n +) шарів. Емітер створеної діодної структури стає катодом стабілітрона, база - анодом. У поверхневому шарі цей перехід має профіль провідності n + -р-, а на дні базової області - n + -р +. Високолегований n + -р + перехід має меншу, ніж в приповерхневому n + -р - шарі, напруга пробію, тому весь зворотний струм стабілітрона саме на дні базової області [86].

Перша інтегральна схема на стабілітронах з прихованим шаром, LM199, була випущена в 1976 році, а абсолютний рекорд за сукупністю точностних характеристик належить випущеній в 1987 році LTZ1000 [37]. Спеціально

відібрані LTZ1000 використовуються в найбільш точних твердотільних еталонах напруги компанії Fluke, яка декларує тимчасову нестабільність в  $1 \text{ ppm} / \text{рік}$  і ТКН в  $0,1 \text{ ppm} / ^\circ \text{C}$  [38] [87]. LM199, LTZ1000 і їх аналоги мають характерну концентричну топологію. У центрі кристала розташований стабілітрон, безпосередньо до нього примикають транзистори - датчики температури, а навколо них «покладена» спіраль підігрівача, також виконана по планарній технології. Зовнішній або вбудований терморегулятор підтримує стабільно високу температуру кристала. Такі ІС мають рекордно низькі показники ТКН (LM199 -  $0,3 \text{ ppm} / ^\circ \text{C}$ , LTZ1000 -  $0,05 \text{ ppm} / ^\circ \text{C}$  [88]), шуму (LTZ1000 -  $1,2 \text{ мкВ}$  пік-пік [88]) і тривалого дрейфу (LTZ1000 -  $2 \text{ мкВ} / 1000 \text{ ч}$  [88]). Заявлені показники досягаються тільки при ретельному Термостатування і екранування схеми і жорсткої стабілізації струму стабілітрона.

Стабілітрон з прихованою структурою (англ. buried zener) — інтегральний кремнієвий стабілітрон, у якому, на відміну від звичайних стабілітронів, під PN-переходом створена прихована область (острівцець) з високою концентрацією акцепторних домішок. Завдяки тому, що струм пробою такого стабілітрона концентрується не у приповерхневих, а в прихованих шарах, його характеристики стабільні і передбачувані. Прецизійні інтегральні джерела опорної напруги (ДОН) на СПС — найбільш точні і стабільні з усіх вироблених типів ІОН. Найкращі ДОН на СПС наближаються за сукупністю показників точності до нормального елемента Вестона.

Внутрішній устрій



### Спрощена топологія прецизійного стабілітрона з прихованою структурою LTZ1000

Звичайні, поверхневі, стабілітрони інтегральних схем будуються на основі типових транзисторних структур. Емітер NPN-транзистора стає катодом стабілітрона, база — анодом. Напруга пробою переходу база-емітер при типових концентраціях носіїв становить  $6,2 \text{ В} \pm 10\%$ , а температурний коефіцієнт цієї напруги (ТКН) дорівнює  $+2,5 \text{ мВ} / ^\circ \text{С}$ . Якщо послідовно з'єднати такий стабілітрон з прямо зміщеним діодом (таким же переходом база-емітер, включеним в протилежному напрямку), що мають ТКН близько  $-2,2 \text{ мВ} / ^\circ \text{С}$ , то ТКН такого термокомпенсованого діода знизиться до величини не більше  $0,5 \text{ мВ} / ^\circ \text{С}$ , або  $80 \text{ ppm} / ^\circ \text{С}$ . Недоліки поверхневих стабілітронів — високий рівень шуму і високий дрейф напруги — обумовлені тим, що струм стабілітрона зосереджений в приповерхневому шарі кремнію. Але там же зосереджені дефекти кристалічної ґратки і сторонні домішки, які і породжують шум і нестабільність. Для того, щоб уникнути цього, слід загнати струм пробою вглиб кристала (в «приховану структуру»), і не допускати пробою переходу база-емітер в приповерхневому шарі.

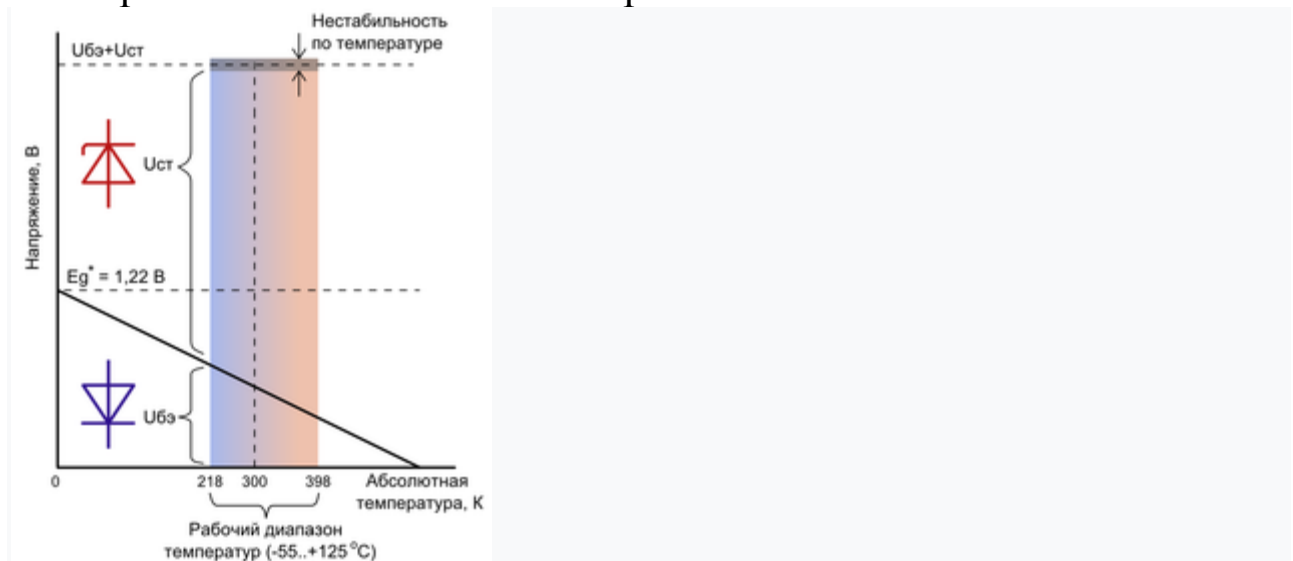
В основі СПС лежить звичайна транзисторна структура, виготовлена за біполярною епітаксіальною технологією з ізоляцією р-п-переходом. Спочатку на поверхні монокристалічної пластини з низькою концентрацією акцепторів (р — тип провідності) формуються широкі острівці п+-типу — майбутні приховані шари колекторів біполярних транзисторів. Потім на підкладці вирощується епітаксіальний колекторний шар п — типу провідності і проводиться глибока дифузія р-домішок — ізоляція PN-переходом. На цьому етапі в центрі майбутнього стабілітрона створюється острівець р+-типу провідності. Звичайний ізоляційний шар р+-типу проникає через

епітаксиальний шар наскрізь, замикаючись на  $p$  — шар підкладки, але під острівцем стабілітрона розташований прихований шар  $p^+$ -типу, що не дозволяє замкнути прокол.

Потім проводяться стандартні кроки базової і емітерний дифузії і металізації. Базовий шар  $p$  — типу стає анодом стабілітрона, емітерний шар  $p^+$ -типу — його катодом, а безпосередньо під катодом як раніше лежить прихований острівець  $p^+$ -типу. Таким чином, бічні стінки PN-переходу мають профіль провідності  $p$  —  $p^+$ , а його дно —  $p^+-p^+$ . Напруга пробою  $p^+-p^+$  переходу істотно нижче, ніж напруга пробою  $p$  —  $p^+$ -переходу, тому весь струм пробою стабілітрона зосереджується на його дні, а приповерхневі ділянки переходу анод-катод, неминуче забруднені сторонніми домішками та неоднорідностями, струм не проводять. Саме тому, через переміщення зони пробою вглиб кристала, стабілітрон з прихованою структурою стабільний, передбачуваний, і менше шумить, ніж стабілітрон звичайний.

ІОН LTZ1000 на стабілітроні з прихованим шаром має характерну концентричну топологію. У центрі кристала розташований стабілітрон, безпосередньо до нього примикають транзистори — датчики температури, а навколо них «покладена» спіраль підігрівача, також виконана по планарній технології. При такій конфігурації градієнт температури кристала спрямований від спіралі до зовнішнього краю, а всередині спіралі, де і розміщений стабілітрон, підтримується практично однорідна температура. Таким чином, стабілітрон захищений від термічних «перекосів», що збільшують нестабільність опорної напруги.

### 3.3. Термокомпенсований стабілітрон



Принцип роботи термокомпенсованого стабілітрона.  $E_g^*$ , або  $V_{magis}$  - фундаментальна постійна, рівна ширині забороненої зони кремнію при  $T_{0ннi}=0$  К (1,143 В) плюс поправка на нелінійність температурної характеристики кремнію (77 мВ). Термокомпенсований стабілітрон - ланцюжок з послідовно сполученого стабілітрона на номінальну напругу близько 5,6 В і прямозміщеного діода - увійшов до практики розробників у кінці 1960-х років[75]. До 2000-м рокам дискретні термокомпенсовані стабілітрони були витіснені інтегральними джерелам опорної напруги, такими, що забезпечили кращі показники точності і стабільності при менших струмах і напрузі живлення[76]. У околиці напруги 5,6 В лавинний механізм пробою переважає над тунельним, але не пригнічує його, а його температурний коефіцієнт має стабільне позитивне значення близько +2 мВ/°С. ТKN діода в прямому включенні при нормальних робітниках температурах і струмах рівний приблизно – 2 мВ/°С.

При послідовному з'єднанні стабілітрона і діода їх температурні коефіцієнти взаємно компенсуються: абсолютна нестабільність по температурі такого ланцюжка може складати всього 5 мВ в діапазоні – 55...+100 °С або 2 мВ в діапазоні 0...+75 °С[77]. Нормований ТKN таких приладів може складати усього лише 0,0005 %/°С, або 5 ppm/°С[78]. Діодом

термокомпенсованого стабілітрона може служити другий стабілітрон, включений в зустрічному напрямі. Такі симетричні двоханодні прилади, що допускають роботу при будь-якій полярності напруги, зазвичай оптимізовані для роботи на номінальному струмі 10 мА[79], чи для струму, типового для цього сімейства стабілітронів (7,5 мА для двоханодного 1n822 із стандартної серії 1n821 – 1n829[80]). Якщо ж діодом термокомпенсованого стабілітрона служить не стабілітрон, а "простий" діод з ненормованою напругою пробою, то експлуатація приладу на прямій гілці вольт-амперної характеристики, як правило, не допускається[81].

Номінальна напруга стабілізації типового термокомпенсованого стабілітрона складає 6,2 або 6,4 В при розкиді в  $\pm 5\%$  (у особливих серіях  $\pm 2\%$  або  $\pm 1\%$ )[77]. У зарубіжній номенклатурі найбільш поширені три серії шестивольтів на номінальні струми 0,5 мА (1n4565 – 1n4569), 1,0 мА (1n4570 – 1n4574) і 7,5 мА (1n821 – 1n829)[82]. Номінальні струми цих серій відповідають струму нульового ТКН; при менших струмах ТКН негативний, при більших - позитивний. Диференціальний опір приладів на 7,5 мА складає 10 або 15 Ом[80], приладів на 0,5 мА - не більше 200 Ом[83]. У технічній документації ці особливості внутрішньої структури зазвичай не розкриваються: термокомпенсовані стабілітрони перераховуються в довідниках нарівні із звичайними або виділяються в окремий підклас "прецизійних стабілітронів"[84]. На принципових схемах вони позначаються тим же символом, що і звичайні стабілітрони[85].

Основною ідеєю було вивчення, аналіз та розробка прецизійного стабілітрона на ефекті Зенера.

### 3.4. Наведення технології виготовлення термокомпенсованого стабілітрона.

#### Процес моделювання

---

Винахід відноситься до термокомпенсованих стабілітронів - напівпровідникових приладів, призначених для жорсткої стабілізації робочої напруги в радіоелектронній апаратурі в умовах температури довкілля, що змінюється. Суть винаходу : запропонований низьковольтний термокомпенсований стабілітрон, що містить кристал легованого кремнію з утвореними в нім основним, компенсуючим і охоронним р - n- переходами, захисними діелектричними шарами, контактними виступами, контактними металевими шарами. Згідно з винаходом кристал виконаний з кремнію, легованого базовою домішкою р- типу провідності - бором, а основний, компенсуючий і охоронний р - n- переходи розташовані на межах між базовими кремнієм р- типу провідності і дифузійними шарами кремнію, легованого домішками n- типу провідності, при цьому контактні шари металу розташовані безпосередньо на поверхнях кремнієвого кристала усередині вікон в захисних діелектричних шарах над областями розташування основного і компенсуючого р - n- переходів, а контактні виступи виконані з металу і розташовані поверх контактних металевих шарів. Спосіб виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона включає виготовлення базового кременевого кристала з основним, компенсуючим і охоронним р - n- переходами, захисними діелектричними шарами, контактними виступами і контактними металевими шарами, виготовлення двох металевих виведень і герметизацію кристала і металевих виведень в скляному корпусі. Згідно з винаходом в якості базового кристала використовують кремній р- типу провідності, охоронний і компенсуючий р, - n- переходи формують у базовому кремнії дифузією легуючої домішки n- типу провідності - фосфором, а основний р - n- перехід - дифузією домішки n- типу провідності - миш'яком. Тонкі контактні шари металу наносять безпосередньо на поверхні кремнієвого

кристала в кругові вікна в захисних діелектричних шарах над областями розташування основного і компенсуючого р - n- переходів, а потім поверх контактних металевих шарів гальванічним методом наносять товсті контактні металеві виступи. Технічним результатом винаходу є створення конструкції і способу виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона, для яких виключаються процеси локального епітаксiального нарощування товстих шарів легованого кремнію. 2 с.п. ф-лы, 6 мул.

Винахід відноситься до термокомпенсованих стабілітронів /ТКС/ - напівпровідникових приладів, призначених для жорсткої стабілізації робочої напруги в радіоелектронній апаратурі /РЭА/ в умовах температури довкілля, що змінюється.

При зміні температури довкілля /Т/ напруга пробою зворотнозміщеного р-n- переходу /UB/ при заданому зворотному струмі /IR/ /см фіг. 1, на якій зображена типова вольт-амперна характеристика р-n- переходу - основного елементу конструкції напівпровідникового приладу - міняє свою величину відповідно до так званого температурного коефіцієнта напруги пробою

$(\alpha_B) : \alpha_B = \frac{1}{U_B} \cdot \frac{\Delta U_B}{\Delta T}, \quad (1)$  де  $\Delta T$  - зміна температури навколишнього середовища, а  $\Delta U_B$  - відповідна зміна напруги пробою р- n- переходу. Залежно від величини напруги р- n- переходу UB величина

$\alpha_B$  може набувати як позитивних, так і негативних значень. Для р- n- переходів з напругою пробою понад 5 В температурний коефіцієнт характеризується позитивною величиною  $\alpha_B > 0$ . В той же час температурний коефіцієнт падіння

напруги на прямозмiщеному р- n- переході  $(\alpha_F)$  де  $\Delta U_F$  - зміна напруги /UF/ на прямозмiщеному р- n- переході при зміні температури довкілля на величину  $\Delta T$ , характеризується тільки негативною величиною:  $\alpha_F < 0$  [1].

$$\alpha_F = \frac{1}{U_F} \cdot \frac{\Delta U_F}{\Delta T}, \quad (2)$$



Послідовне з'єднання зворотнозміщених р- n- переходів з позитивними величинами температурних коефіцієнтів  $/U_B > 5\text{В}/$  та прямозміщених р- n- переходів з властивими їм негативними величинами температурних коефіцієнтів прямого падіння напруги ( $\alpha_F$ ), принцип конструювання термокомпенсованих стабілітронів з результируючим температурним коефіцієнтом напруги стабілізації  $U_{ст} = U_B + U_F$  і температурним коефіцієнтом напруги стабілізації  $\alpha_{ст} = (+)\alpha_B + (-)\alpha_F$ , (3) где  $|\alpha_B| \approx |\alpha_F|$ , тобто з  $\alpha_{ст}$ , близьким до нуля, і відповідно з практично незмінною робочою напругою  $U_{ст}$  в широкому діапазоні робочих температур.

Зокрема, добре поєднуються зворотнозміщений р- n- перехід з  $U_B \approx 5,5\text{ В}$  і прямозміщений р- n- перехід з  $U_F \approx 0,7\text{ В}$ . В цьому випадку термокомпенсований стабілітрон характеризується результируючою напругою стабілізації  $U_{ст} \approx 6,2\text{ В}$  і температурним коефіцієнтом напруги стабілізації ( $\alpha_{ст}$ ), близьким до нуля.

Послідовним з'єднанням р- n- переходів з  $U_B \approx 7\text{ В}$  чи  $\approx 7,4\text{ В}$  з двома прямозміщеними р- n- переходами  $/2U_F \approx 1,4\text{ В}/$  отримують більше високовольтні ТКС з результируючою напругою стабілізації відповідно до 8,4 і 9,0 В. Предмет справжнього винаходу - низьковольтні термокомпенсовані стабілітрони з напругою стабілізації 6,2 В. Потреба в низьковольтних

ТКС з  $U_{ст} 6,2\text{ В}$  останніми роками помітно перевищує потребу в ТКС з більш високими рівнями напруги стабілізації, зокрема з  $U_{ст} 9,0\text{ В}$ . Останнє пояснюється тенденцією зниження рівнів робочої напруги в сучасній РЭА, основні елементи якої - малопотужні інтегральні мікросхеми. Є значні конструктивні і технологічні проблеми отримання низьковольтних термокомпенсованих стабілітронів /НВ ТКС/ з  $U_{ст} 6,2\text{ В}$ , обумовлені проблемами керованого виготовлення кремнієвих р- n-

переходів з напругою пробією 5,5 В, на основі яких конструюються НВ ТКС. Це обумовлено, у свою чергу, відомими фізичними чинниками. Зокрема, для формування р- n- переходів з

$U_B < 6$  В потрібний кремній з концентрацією базової легуючої домішки порядку  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  і більше, що знаходиться на межі можливого однорідного розподілу легуючої домішки в кристалічній решітці кремнію. Для перекомпенсації базової домішки з концентрацією такого порядку, то-єсть для створення р- n- переходу, потрібно компенсуючу домішку протилежного типу провідності, гранична розчинність якої в кремнії вище за концентрацію базової легуючої домішки на два-три порядки, а умови формування низьковольтного р- n- переходу повинні забезпечувати в області його залягання гранично високий градієнт концентрації компенсуючий домішка. Вказаним умовам відповідають технології отримання так званих р- n- переходів, то-єсть р- n- переходів з високим градієнтом концентрації легуючої домішки : сплавна - вплавлення в кремній n-типа провідності алюмінію - акцепторній домішці р-типа провідності, іонного легування і епітаксialного.

Технологія виготовлення низьковольтних р- n- переходів сплавом алюмінію з кремнієм втратила свої позиції у зв'язку з недостаточної надійністю сплавних р- n- структур: що виходить на поверхню кремнію сплавної р- n- перехід важко забезпечити надійним діелектричним захистом. Технологія іонного легування носить обмежений характер із-за необхідності використання надпотужних установок /сотні електронвольт/ і застосування спеціальних конструктивних хитрощів при виготовленні кристала з р- n- переходами. Зокрема, виникає необхідність використання структури з виведенням за межі омичного контакту дрібним /долі мікрометрів/ р- n- переходом, оскільки в процесі роботи напівпровідникового приладу існує можливість проникнення матеріалу контакту в область залягання р- n- переходу і відповідно до деградації його характеристик [2].

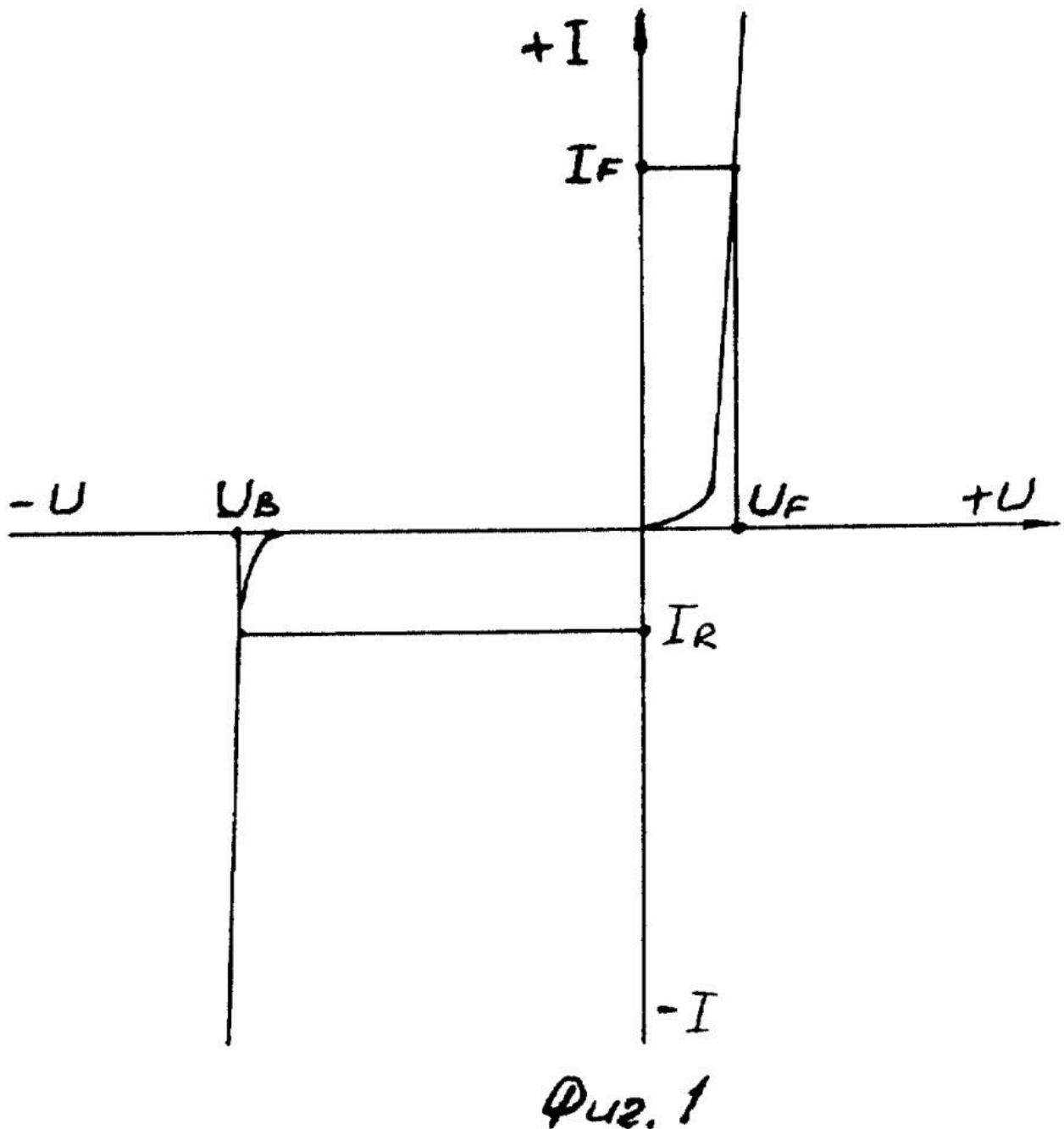
Епітаксialна технологія отримання низьковольтних р- n- переходів вимагає використання прецизійного технологічного устаткування, є дуже енергоємною і застосовує надзвичайно токсичні матеріали: диборан, фосфін, арсин і тому подібне. Таким чином, завдання отримання низьковольтних р- n- переходів і тим більше низьковольтних термокомпенсованих стабілітронів на їх основі носять неординарний характер і відрізняються високою мірою складності [3].

Альтернативний метод отримання низьковольтних р- n- переходів - висококонцентрована дифузія миш'яку в сильнолегирований кремній р-типа провідності в умовах відкачаної до низького тиску кварцевої ампули. Метод дифузії ампули миш'яку забезпечує відтворне формування різких низьковольтних р- n- переходів з напругою пробою менше 6 В на достатній для конструювання стабілітронів глибині /одиниці мікрометрів/[4].

Миш'як - донорна домішка n- типу провідності. Відрізняється від усіх інших донорних домішок найвищою граничною розчинністю в кремнії: до  $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  і відносно хорошою сумісністю з ґратами кремнію внаслідок майже повного збігу радіусів тетраедрів атомів миш'яку і кремнію. Ця властивість миш'яку забезпечує отримання якісних р- n- переходів в кремній, то-єсть без супутнього зазвичай /у разі інших донорних домішок/ дефектоутворення в області р- n- переходу. Метод отримання низьковольтних нетермокомпенсованих стабілітронів /з одним зворотнзміщеним р- n- переходом/ дифузією миш'яку в р-кремній в умовах евакуйованої ампули відрізняється високою технічною і економічною ефективністю в умовах великосерійного виробництва.

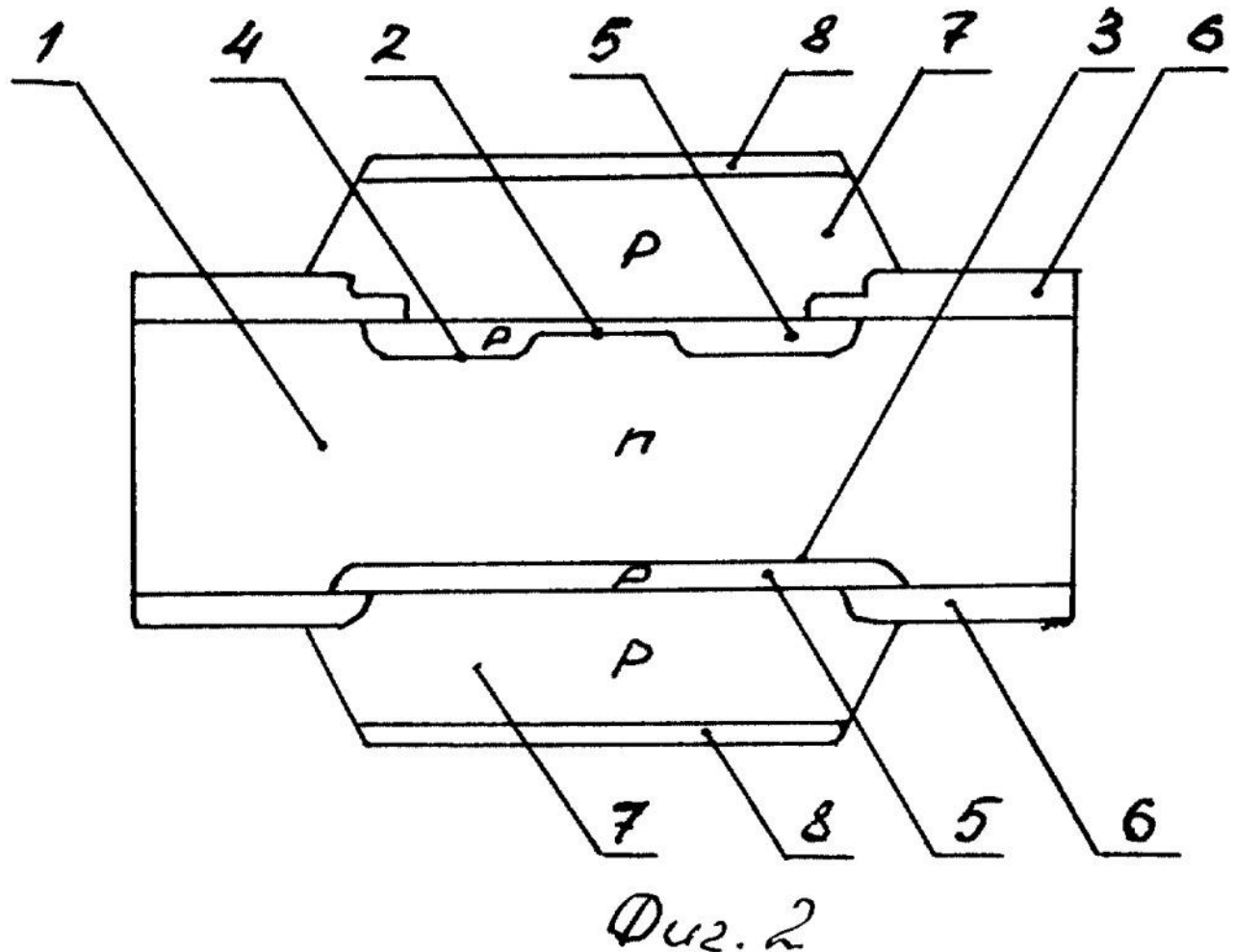
Вказаний метод застосований також в технології виготовлення низьковольтних термокомпенсованих стабілітронів по справжньому винаходу. Найбільш близьким до пропонованих конструкції низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона і способу її виготовлення являється низьковольтний стабілітрон фірми

Thomson Semiconductors [см. 1].



Вказаний термокомпенсований стабілітрон містить /см фіг. 2, на якій схемний зображена структура кременевого кристала стабілітрона-прототипу/ базовий кристал 1 кремнію, легованого домішкою n- типу провідності - фосфором з освітою в ній основним 2, компенсуючим 3 і охоронним 4 p- n- переходами, розташованими на межах між кристалом 1 n- кремнію і шарами 5 кремнію, легованого домішкою протилежний типу провідність /p-кремний/ - бор, захисний діелектричний шар 6 оксид кремній, контактний виступ 7 з кремній, легований бор, контактний шар 8 метал - срібло - поверх кремнієвий контактний виступ 7. Кристали 1 з вказаними активними /p- n- переходи/ і

пасивними /діелектричні і контактні шари/ елементами герметизуються разом з двома аксіальними металевими виведеннями в циліндричний скляний корпус.



Охоронний р-п-перехід 4 виконує в конструкції кристала 1 термокомпенсованого стабілітрона допоміжну функцію: виключає можливий неконтрольований пробій основного р-п-переходу 2 за рахунок відсікання викривленої кривої його частини, в якій напруженість електричного поля вище за напруженість поля в плоскій частині р-п-переходу, а також виключає можливу нестабільність параметрів основний р-п-перехід 2 із-за можливий витік струм по поверхню у разі безпосередній вихід основний р-п-перехід 2 на межа кремній 1 - діелектрик 6.

Виступи 7 з кремнію, сильно легованого акцепторною домішкою - бором, виконують роль джерел дифузії бору, що формує різкий, відносно дрібний /долі мікрметрів/ основної 2 і плавніший компенсуючий 3 р-п-переходи. Кремнієві виступи 7 виконують також роль злокалізованих контактних електродів, що запобігають закороченню плоских торців металевих виведень з

гранями кристала 1 при складанні кристалів 1 і металевих виведень в скляному корпусі. Кристал 1 низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона-прототипу /см фіг. 2/ виготовляють /см фіг. 3, на якій показана схема виготовлення стабілітрона - прототипу/ на основі кремнію n- типу провідності /n- кремній/, легованого донорною домішкою - фосфором /стадія А процесу на фіг. 3/. Верхню і нижню сторони базового кремнієвого кристала 1 покривають оксидом кремнію 6 /стадія б процесу на фіг. 3/. Оксид кремнію 6 виконує роль захисної маски при подальших дифузійних процесах, а також - захисного діелектрика в місцях виходу p- n- переходів 3, 4 на поверхню кремнію 1. Потім /стадія В процесу на фіг. 3/ в шарі 6 кремнію з верхнього боку кристала 1 розкривають кільцеве вікно 9, в яке проводять дифузію бору, що формує кільцевий охоронний p- n- перехід 4 /стадія Г процесу на фіг. 3/. Завершальний етап дифузії бору ведеться в окислювальному середовищі. Оксид кремнію, що утворюється при цьому, 6 закриває розкрите раніше кільцеве вікно 9 /стадія Д процесу на фіг. 3/. Далі /стадія Е процесу на фіг. 3/ в оксиді кремнію 6 з нижнього боку кристала 1 методом фотолітографії розкривають кругове вікно 10, в яке /стадія ж процесу на фіг. 3/ методом товстостінної локальної епітаксії осаджують кремнієвий виступ 7, легований бором. Потім /стадія З процесу на фіг. 3/ розкривають кругове вікно 11 в оксиді кремнію 6 з верхнього боку кристала 1, в яке також осаджують методом товстостінної локальної епітаксії виступ 7 з кремнію, легованого бором /стадія І процесу на фіг. 3/. Під час високотемпературних процесів локальної епітаксії легованих бором кремнієвих виступів 7 послідовно - з нижньою /стадія ж процесу на фіг. 3/ і верхньою /стадія І процесу на фіг. 3/ сторін кристала 1 під виступами 7 утворюються відповідно компенсуючий 3 і основний 2 p- n- переходи за рахунок дифузії бору - акцепторної домішки в кремній 1, легований фосфором - донорною домішкою. Потім /стадія К процесу на фіг. 3/ на кремнієві виступи 7 наносять шари 8 контактного металу - срібла. На закінчення кремнієвий кристал 1 з сформованими в нім активними і пасивними структурами герметизують разом з двома аксіальними металевими виведеннями в циліндричному скляному корпусі /стадія Л процесу на фіг. 3/. Недолік відомої конструкції і способу виготовлення низьковольтного термокомпенсованого

стабілітрона - використання в технології його виготовлення надзвичайно складних і дорогих процесів товстошарової локальної епітаксії кремнію, причому - в два етапи при послідовному нарощуванні кремнієвих контактних виступів 7 /стадій Ж, І процесу на фіг. 3/.

Завдання справжнього винаходу - створення такої конструкції і способу виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона, для яких виключаються процеси локального епітаксiального нарощування товстих шарів легованого кремнію.

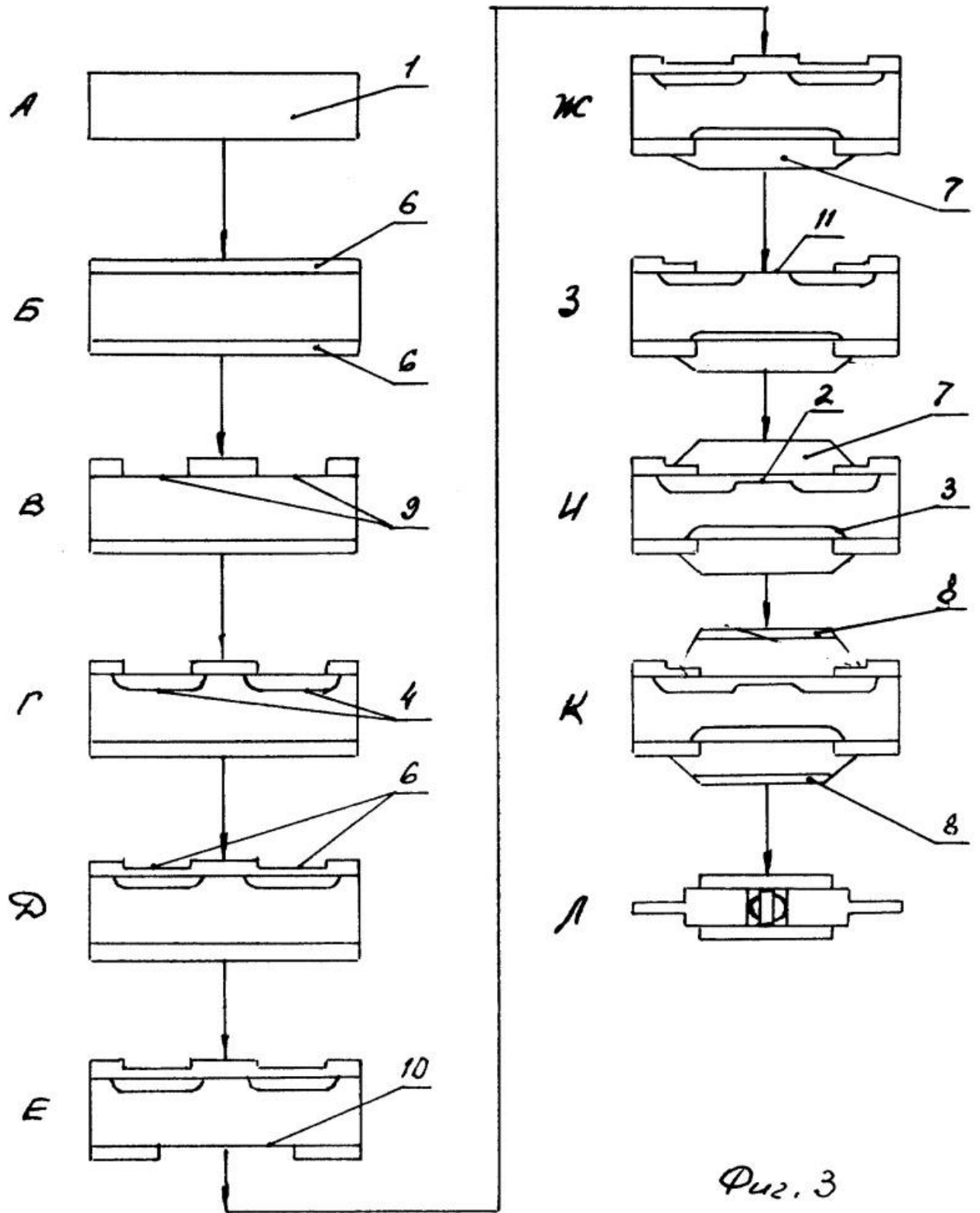
Вказане завдання вирішується тим, що запропонований низьковольтний термокомпенсований стабілітрон, що містить базовий кристал легованого кремнію з освітою в нім основним, компенсуючим і охоронним р- п- переходами, захисними діелектричними шарами, контактними виступами і контактними шарами металу, двох металевих виведень і скляний корпус, в якому, згідно з винаходом, базовий кристал виконаний з кремній, легований домішка р- тип провідність - бор, а основний, компенсуючий і охоронний р - п- перехід розташований на межа між базовий кремній р- тип провідність і дифузійний шар кремній, легований домішка п- тип провідність, при цьому контактний шар метал розташований безпосередньо на поверхня кремнієвий кристал усередині вікно в захисний діелектричний шар над область розташування основний і компенсуючий р - п- перехід, а контактний виступ виконаний з метал і розташований поверх контактний металевий шар.

Завдання вирішується також тим, що запропонований спосіб виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона, що включає виготовлення базового кремнієвого кристала з основним, компенсуючим і охоронним р - п- переходами, захисними діелектричними шарами, контактними виступами і контактними металевими шарами, виготовлення двох металевих виведень і герметизацію кремнієвого кристала і металевих виведень в скляний корпусі, по який, згідно з винахід, в якості базовий кристал використав кремній р- тип провідність, причому охоронний і компенсуючий р - п- перехід у базовий кристал формує одночасний дифузія легуючий домішка п- тип провідність -

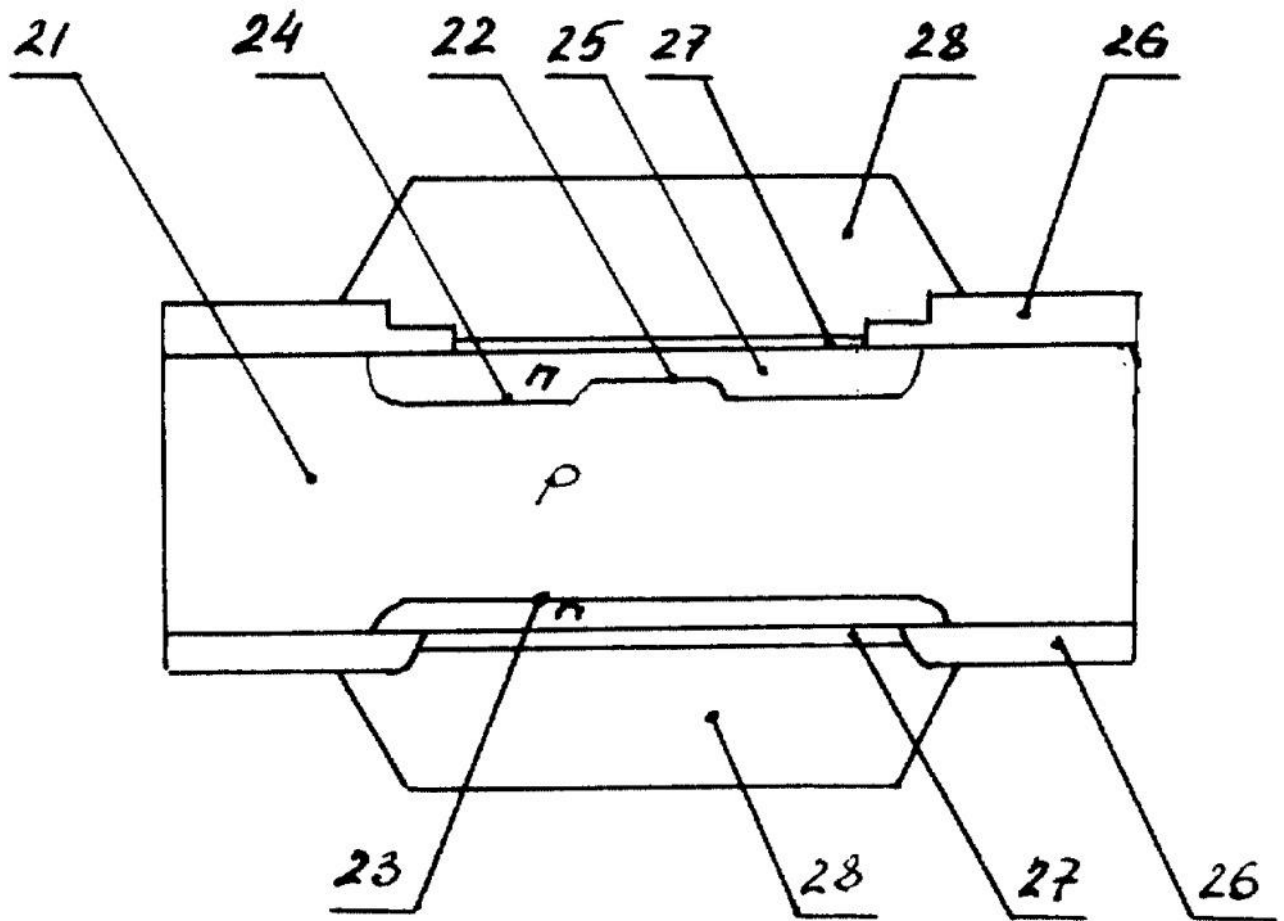
фосфор, а основний р - n- перехід формує у базовий кремній дифузія легуючий домішка n- тип провідність - миш'як, і тонкі контактні металеві шари наносять безпосередньо на поверхні кремнієвого кристала в кругові вікна в захисних діелектричних шарах над областями розташування основного і компенсуючого р - n- переходів, а контактні виступи виконують з металу і наносять гальванічним методом поверх контактних металевих



шарів.



Суть винаходу пояснюється кресленнями.



Фиг. 4

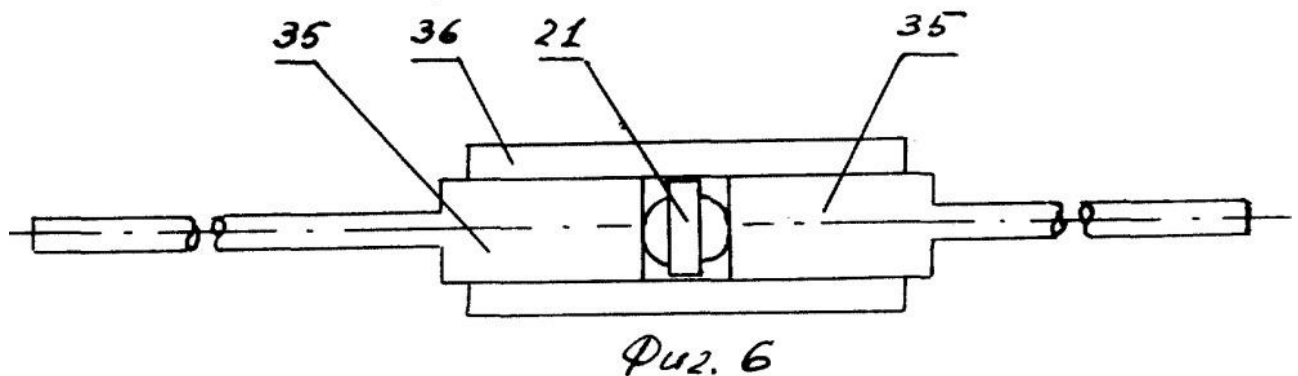
На фіг. 4 зображена структура базового кристала пропонованого термокомпенсованого стабілітрона. На фіг. 5 представлена схема етапів виготовлення базового кристала пропонованого стабілітрона /короткий технологічний маршрут/. На фіг. 6 показано складання базового кристала з двома аксіальними металевими виведеннями в циліндричному скляному корпусі. Пропонований термокомпенсований стабілітрон складається з базового кристала /см фіг. 4/, двох аксіальних металевих виведень і скляного корпусу /см фіг. 6/. Базовий кристал 21 /см фіг. 4/ виконаний з кремнію р- типу провідності, легованого домішкою акцепторного типу - бором, і містить основний 22, компенсуючий 23 і охоронний 24 р - n- переходи, розташовані на межах між базовим кремнієм 21, легованим домішкою р- типу провідності, і шарами кремнію 25, легованими домішками n- типу провідності, захисні діелектричні шари 26, тонкі шари 27 контактного металу і контактні металеві виступи 28. Пропонований термокомпенсований стабілітрон працює таким

чином. Стабілітрон /см фіг. 6/ включають в електричну схему так, щоб основний р - п- перехід 22 кристали 21 /см фіг. 4/ знаходився під напругою зворотного зміщення /напруга пробою  $U_B$ , см фіг. 1/: плюс - на виступі 28 з боку основного р - п- переходу 22, мінус - на виступі 28 з боку компенсуючого р - п- переходу 23. При цьому компенсуючий р - п- перехід 23, розташований в кристалі 21 послідовно з основним р - п- переходом 22, знаходиться в стані прямого зміщення /пряме падіння напруги  $U_F$ , см фіг. 1/.

В цьому випадку при деякому заданому струмі стабілізації  $I_{ст}$ / результуюче падіння напруги на стабілітроні /напруга стабілізації  $U_{ст}$ / складається з напруги пробою  $U_B$  / см. фиг.1/ основного р - п- переходу 22 і падіння напруги на прямозміщеному компенсуючому р - п- переході 23/ $U_F$ , см фиг. 1/:  $U_{ст}=U_B+U_F$ .

(4) Оскільки результуючий температурний коефіцієнт напруги стабілізації ( $\alpha_{ст}$ ) стабілітрона з послідовно сполученими зворотнозміщеним основним 22 і прямозміщеним компенсуючим 23 р - п- переходами близький до нуля /см формулу 3/, те при експлуатації такого стабілітрона в умовах температури довкілля, що змінюється, його напруга стабілізації  $U_{ст}$ / залишається практично незмінним, тобто такий термокомпенсований стабілітрон може використовуватися як джерело опорної напруги. Суть способу виготовлення пропонованого термокомпенсованого стабілітрона пояснюється описом етапів здійснення способу /см фіг. 5/ і конкретних прикладів його виготовлення. Кристал 21 пропонованого стабілітрона виготовляють /стадія А процесу на фіг. 5/ з кремнію р- типу провідності /р- кремній/, легованого акцепторною домішкою - бором. Верхню і нижню сторони базового кристала 21 покривають /стадія б процесу на фіг. 5/ оксидом кремнію 26. Потім /стадія В процесу на фіг. 5/ в діелектричних шарах 26 оксиду кремнію розкривають: з верхнього боку кристала 21 кільцеве вікно 29, з нижнього боку кристала 21 кругове вікно 30. Далі /стадія Г процесу на фіг. 5/ в розкриті в оксиді кремнію 26 вікон 29, 30 проводять одночасно з двох сторін кристала 21 дифузію донорної домішки - фосфору, що супроводжується вторинним окисленням кремнія 21 в облястях вікон 29,30.

В процесі двосторонньої дифузії фосфору у базовий кремній 21 формуються компенсуючий 23 і охоронний 24 р - n- переходи. На наступному етапі /стадія Д процесу на фіг. 5/ в шарі 26 оксиду кремнію з боку охоронного р - n- переходу 24 розкривають кругове вікно 31, в яке потім /стадія Е процесу на фіг. 5/ проводять дифузію в неокислюючому середовищі донорної домішки - миш'яку, формуючи тим самим основний р - n- перехід 22. Далі /стадія ж процесу на фіг. 5/ розкривають кругове вікно 32 в оксиді кремнію 26 з боку компенсуючого р - n- переходу 23. Потім /стадія З процесу на фіг 5/ на нижню і верхню сторони кристала 21 наносять тонкі шари контактного металу 27. Поверх шарів 27 наносять /стадія І процесу на фіг. 5/ шарів 33 фоторезиста. Далі в шарах 33 фоторезиста розкривають /стадія До процесу на фіг. 5/ з обох боків кристала 21 кругові вікна 34 до металізації 27. Потім /стадія Л процесу на фіг. 5/ у вікнах 34 вирощують гальванічним методом металеві, наприклад срібні, контактні виступи 28. Далі /стадія М процесу на фіг. 5/ видаляють шари фоторезиста 33 і металізації 27 навколо контактних виступів 28. На закінчення кристал 21 з активними і пасивними структурами герметизують разом з двома аксіальними металевими виведеннями 35 в циліндричному скляному корпусі 36 /см фіг. 6/.



Приклад 1. Відповідно до короткого технологічного маршруту /см фіг. 5/ пластин кремнію р- типу провідності з питомим опором 0,008 Ом•см покривали з двох сторін оксидом кремнію 26 при температурі 1150 °С до товщини 0,65 мкм. У захисних шарах 26 методом одночасної двосторонньої фотолітографії розкривали вікна: кільцеві 29 на верхній поверхні пластинів 21 з внутрішнім діаметром кільця 50 мкм і зовнішнім діаметром кільця 100 мкм і з нижнього боку пластинів кремнію кругові вікна 30 діаметром 350 мкм. Далі в розкритих в оксиді кремнію вікнах 29, 30 дифузією фосфору з газової фази /дифезант - трихлористий фосфор/ формували охоронні р - n- переходи 24 - в кільцевих вікнах з верхнього боку пластинів і компенсуючі р - n- переходи 23 - з нижнього боку пластинів. Режим дифузії фосфору : осадження - при температурі 1030 °С впродовж 1 години, окислювальний перерозподіл - при температурі 1200 °С впродовж 4 годин.

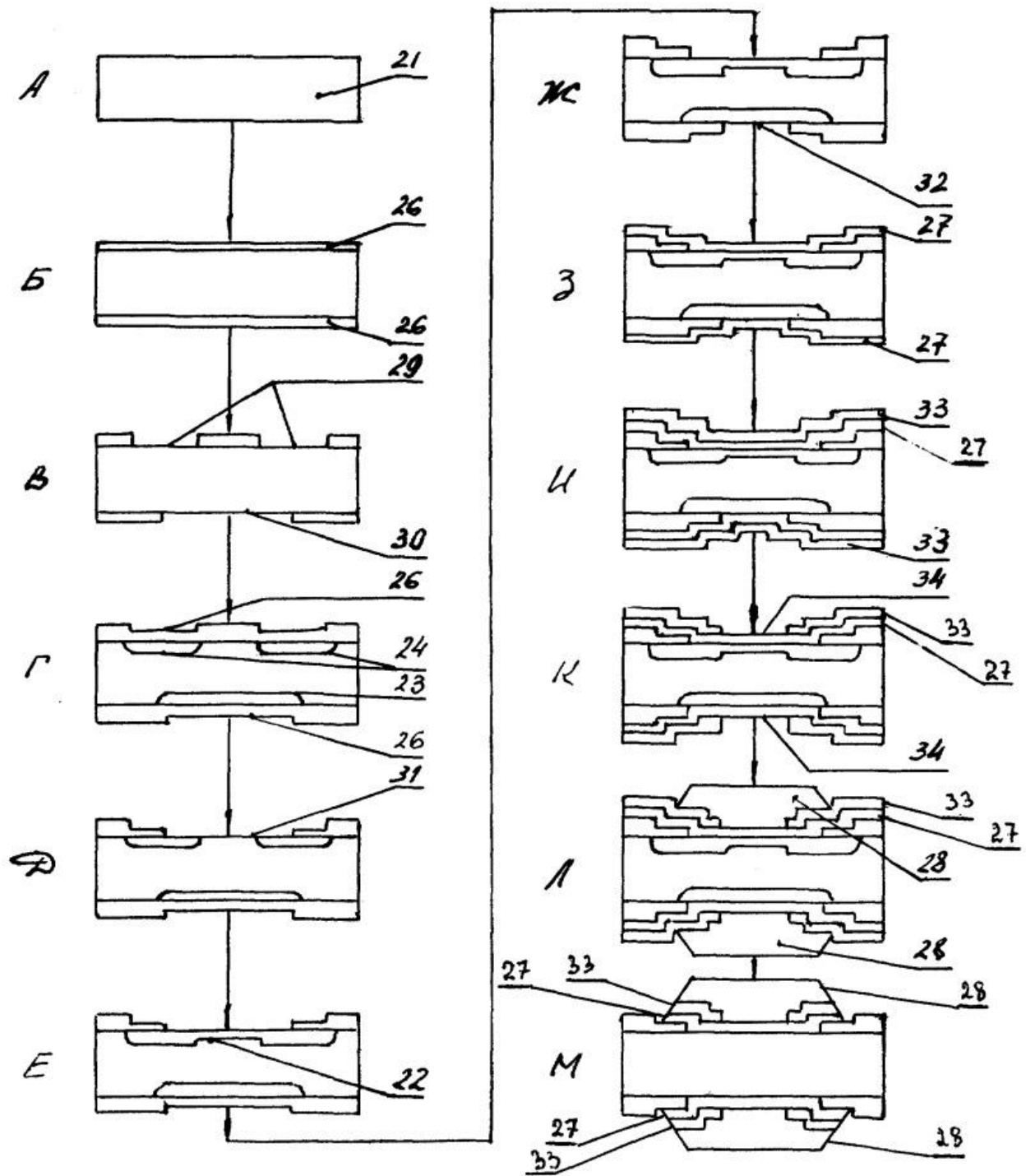
Захисні шари оксиду кремнію 26 додатково пасивували осадженням на них шарів фосфоросилікатного скла завтовшки 0,1 мкм в режимі: температура - 1030°С, час - 15 хвилин. Гігроскопічне фосфоросилікатне скло захищали від дії вологи докіль шаром полікремнія товщиною 0,3 мкм. Далі з боку кільцевих охоронних р - n- переходів 24 методом фотолітографії в діелектричних шарах 26 розкривали кругові вікна 31 діаметром 75 мкм, в які при температурі 1150°С впродовж 1 години в умовах евакуйованої кварцевої ампули проводили дифузію миш'яку з металевого джерела. Потім в діелектричних захисних шарах 26 з нижнього боку кремнієвих пластинів над областями компенсуючих р - n- переходів 23 розкривали кругові вікна 32 діаметром 75 мкм. Далі на верхні і нижні сторони кремнієвих пластинів методом двостороннього напилення наносили двошарову контактну металізацію 27 ванадій-срібло з сумарною товщиною 0,5 мкм. Поверхні пластинів, покриття металізацією 27, захищали шарами фоторезиста 33 марки ФП- 383, в якому з верхньою і нижньою сторін пластинів розкривали далі кругові вікна 34 діаметром 200 мкм над основним 22 і компенсуючим 23 р - n- переходами до шарів металізації 27. В розкриті таким чином вікна 34 гальванічним методом локально осаджували поверх тонкої металізації 27 срібний виступ 28 завтовшки 35 мкм. Потім

видаляли /стравлювали/ допоміжні маскуючі шари 33 фоторезиста і шари 27 тонкій металізації навкруги гальванічних срібних виступів 28.

Кремнієві пластини з сформованими в них структурами розділяли методом лазерного скрайбирования на кристали 21. І, нарешті кристали 21 герметизували разом з аксіальними виведеннями з платиніту в скляні корпуси 36 типу КД- 2 - повних аналогів корпусів типу ДО- 35, вживаних фірмою Thomson Semiconductors [см 1], для герметизації термокомпенсованих стабілітронів - прототипів. Виготовлені таким чином низьковольтні термокомпенсовані стабілітрони з напругою стабілізації 6,2 В піддавали типовим технологічним відбракуванням і випробуванням, досліджували їх характеристики і випробовували на відповідність діючим стандартам.

Приклад 2. Термокомпенсовані стабілітрони з напругою стабілізації 6,2 У виготовляли по описаній в Прикладі 1 технології на кремнії р- типу провідності з питомим опором  $0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Дифузію миш'яку при формуванні основного р - n- переходу 22 проводили в цьому випадку при температурі  $1150^{\circ}\text{C}$  в течение 0,5 часа.

Приклад 3. Термокомпенсовані стабілітрони з напругою стабілізації 6,2 В отримували по описаній в Прикладі 1 технології на кремнії з питомим опором  $0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Дифузію миш'яку при формуванні основного р - n- переходу проводили в цьому випадку при температурі  $1150^{\circ}\text{C}$  впродовж 1,5 години. В результаті за технологією, описаною в Прикладах 1-3, отримані термокомпенсовані стабілітрони з напругою стабілізації 6,2 В при струмі 0,5 мА і температурним коефіцієнтом напруги стабілізації в діапазоні від 0,01 до  $0,00025\%/^{\circ}\text{C}$ . До 60% з них відносяться до класу  $0,002\%/^{\circ}\text{C}$ . З них до 30% приладів належать до класу  $0,001\%/^{\circ}\text{C}$  і 10% - до класу  $0,0005\%/^{\circ}\text{C}$ .



Фиг. 5

Результати дослідження довготривалої стабільності зразків термокомпенсованих стабілітронів з напругою стабілізації 6,2 В, виготовлених по справжньому винаходу, і зразків стабілітронів - прототипів /прилади типу IN 4567 фірми Thomson Semiconductors [см.1]/ свідчать про перевагу стабілітронів, виготовлених по справжньому винаходу : відхід напруги стабілізації зразків стабілітронів, виготовлених по справжньому винаходу, при

випробуваннях впродовж 500 годин при температурі довкілля 125°C в два рази менше відходу напруги стабілізації зразків - прототипу.

Використання в пропонованій конструкції низьковольтних термокомпенсованих стабілітронів металевих контактних виступів з срібла замість кремнієвих, вживаних в конструкції прототипу, забезпечує також, як показали дослідження, кращі перевантажувальні характеристики пропонованого приладу в порівнянні з прототипом, то-єсть велику його надійність, що пояснюється відносно низькій тепло- і електропровідністю срібла в порівнянні з кремнієм.



#### 4. Стартап проект

##### Формула винаходу

1. Низьковольтний термокомпенсований стабілітрон, що містить базовий кристал легованого кремнію з утвореними в нім основним, компенсуючим і охоронним р - n- переходами, захисними діелектричними шарами, контактними виступами і контактними шарами металу, двох металевих виведень і скляний корпус, що відрізняється тим, що базовий кристал виконаний з кремнію, легованого домішкою р-типа провідність - бор, а основний, компенсуючий і охоронний р - n- перехід розташований на межах між базовим кремнієм р- тип провідності і дифузійний шар кремнію, легований домішкою n- тип провідності, при цьому контактний шар металу розташований безпосередньо на поверхні кремнієвого кристала усередині вікна в захисний діелектричний шар над областю розташування основного і компенсуючого р - n- перехід, а контактний виступ виконаний з металу і розташований поверх контактний металевий шар.

2. Спосіб виготовлення низьковольтного термокомпенсованого стабілітрона по п. 1, що включає виготовлення базового кремнієвого кристала з основним, компенсуючим і охоронним р - n- переходами, захисними діелектричними шарами, контактними виступами і контактними металевими шарами, виготовлення двох металевих виведень і герметизацію кремнієвого кристала і металевих виведень в скляному корпусі, що відрізняється тим, що в якості базовий кристал використовує кремній р-типа провідності, причому охоронний і компенсуючий р - n- перехід у базовий кристал формує одночасний дифузійний легуючий домішкою n- тип провідності фосфор, а основний р - n- перехід формують у базовому кремнії дифузійною легуючою домішкою n- типу провідності - миш'яком, і тонкі контактні металеві шари наносять безпосередньо на поверхні кремнієвого кристала в кругові вікна в захисних діелектричних шарах над областями розташування основного і компенсуючого р - n- переходів, а

контактні виступи виконують з металу і наносять гальванічний метод поверх  
контактний металевий шар.

## 5.Висновки

Основною ідеєю було вивчення, аналіз та розробка прецизійного стабілітрона на ефекті Зенера.

Ідеєю проекту була розробка низковольтного термокомпенсованого стабілітрона.

Результатом дослідження є підхід до моделювання та дослідження довготривалої стабільності зразків термокомпенсованих стабілітронів з напругою стабілізації 6,2 В, виготовлених по справжньому винаходу, і зразків стабілітронів - прототипів /прилади типу IN 4567 фірми Thomson Semiconductors [см.1]/ свідчать про перевагу стабілітронів, виготовлених по справжньому винаходу : відхід напруги стабілізації зразків стабілітронів, виготовлених по справжньому винаходу, при випробуваннях впродовж 500 годин при температурі довкілля 125°C в два рази менше відходу напруги стабілізації зразків - прототипу.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна зазначити, що проект має шанси на ринкову комерціалізацію. Ідея має досить багато напрямів застосування, а саме галузі електронної промисловості критичні з точки зору безпеки. Проект є конкурентноспроможним, оскільки знадобиться багатьом компаніям, що розробляють ІС з підвищеними вимогами до безпеки,

в умовах відсутності ефективного і автоматизованого процесу оцінки безпеки електронних приладів.

Проект можливо реалізувати з технічної точки зору, оскільки інструменти для реалізації доступні та достатньо розвинуті. До того ж, проект орієнтований на економне використання.

Конкуренцію на ринку подібних систем складають лише власні методи аналізу компаній потенційних клієнтів. Поява нового продукту на ринку дозволить компаніям не розробляти власні інструменти, а скористатися готовим рішенням.

У проекту є широкий вибір альтернатив ринкової поведінки, від великих компаній або розробка і поширення інструменту внесення відмов для конкретної галузі електронної промисловості (наприклад авіакосмічної).

Маркетингова програма включатиме концепцію товару як програмного продукту, що є сумісним з проектами ІС, виконаними в найбільш поширених системах автоматизованого проектування, із каналами збуту та просування продукту через мережу інтернет, а також гнучким ціноутворенням, що адаптується під конкретний проект.

## 6. Використана література

### Джерела інформації

1. DATA BOOK, 1986. Зенерівські і захисні діоди фірми Томсон. Стор. 42, 186, 188.
2. Фэйр Р.Б., Вивел Х.В. Зенерівський і лавинний пробій в низьковольтних кремнієвих р - п- переходах, виготовлених іонним легуванням кремнію миш'яком. - IEEE Trans. on Electron.D, 1976, ED - 23, N 5, p.512.
3. Такэси С., Мицуру У. Основні принципи і характеристики епітаксiального діода Зенера. - Дэнси Гидзюцу, 1968, т. 10, N 10, с. 87-91.
4. Кушнірiв С.П. Спосiб дифузiї миш'яку в кремнiй. - А.с. на винахiд N 888763, БИ N 45, 1981, с. 278.
5. В.К. Аладинский, В.А. Овчинников та iн. Нове поколiння ультрастабильных прецизiйних стабiлiтронiв // Вимiрювальна технiка. 1996. - №11. - С.44.2. 1999 SEMI CIS Executive mission and exhibit // May 17-19 Moscow 19996.
6. Перельман Б.Л. Полупроводниковые приборы. Справочник. -«Солон». «Микротех». 1996. - С. 176.
7. J. Michejda, Suk K. Kim. A precision CMOS bandgap reference // IEEE J. of S.-S. C. 1984. - V. SC - 19. - №6. - P. 1014-1022
8. Сектор електронних компонентiв. Россия- 99. Довiдник. М.: - Вид-во "Додека". - 1999. - 1440 с.

9. Мікросхеми для аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів.

Довідник. М.: - Вид-во "Додека". - 1997. - 354 с.

10. Напівпровідникові прилади, діоди випрямні, стабілітрони, тиристори :

Довідник. під ред. А.В. Голомедова. -М.: - Радіо і зв'язок. - 1989. - 302 с.

11. Linear application handbook. National Semiconductor. 1992. - P. 890

12. W. Shokley, W.T. Read, Jr. Statistics of the recombination of holes and electrons. // Phys. Rev. 1952. - V.87. - №5. - P. 835-842. 13. Dance Mike.

Voltage reference devices guarantee! temp coeff. and drift. // Electronics Industry.

- 1982. - P. 37-39

